



УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ
КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
РАН

**О. Ю. ЛАВРОВА, А. Г. КОСТЯНОЙ, С. А. ЛЕБЕДЕВ,
М. И. МИТЯГИНА, А. И. ГИНЗБУРГ, Н. А. ШЕРЕМЕТ**

КОМПЛЕКСНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МОРЕЙ РОССИИ

**МОСКВА
2011**

УДК 528.88; 551.465; 551.463.8; 551.463.6; 528.873.044.1; 629.78
К63

Рецензент:

д-р физ.-мат. наук *С. А. Ермаков*, д-р техн. наук *Е. А. Лупян*

Авторы:

*О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев,
М. И. Митягина, А. И. Гинзбург, Н. А. Шеремет*

К63 **Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев и др.**— М.: ИКИ РАН, 2011.— 480 с. : табл., ил., цв. ил.

ISBN 978-5-9903101-1-7

В монографии обобщены теоретические основы и имеющийся многолетний опыт проведения комплексного спутникового мониторинга экологического состояния морей России. В основу книги положены результаты спутникового мониторинга Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, проведенного коллективами сотрудников Института космических исследований Российской академии наук (Москва, Россия), Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (Москва, Россия) и Геофизического центра Российской академии наук (Москва) в сотрудничестве с Морским гидрофизическим институтом Национальной академии наук Украины (Севастополь, Украина) в 2004–2011 гг. Особое внимание уделено результатам оперативного мониторинга нефтяного загрязнения в районе Кравцовского нефтяного месторождения в юго-восточной части Балтийского моря (2004–2005) и постоянного многосенсорного спутникового мониторинга Черного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей (2006–2011). Рассмотрены некоторые аспекты регионального изменения климата южных морей России и особенности мезомасштабной и мелкомасштабной динамики их вод. Описан опыт оперативного многосенсорного мониторинга нефтяных катастроф в Керченском проливе (2007) и в Мексиканском заливе (2010). Даны рекомендации по организации комплексного спутникового мониторинга морей России.

Монография адресована широкому кругу специалистов в области дистанционного зондирования океанов и морей из космоса, океанологии, экологии, защиты окружающей среды, а также преподавателям, аспирантам и студентам профильных высших учебных заведений. Книга будет интересна работникам нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей России. В книге приведено большое количество иллюстративного материала и обширный список литературы, посвященной различным аспектам дистанционного зондирования Земли из космоса.

O. Yu. Lavrova, A. G. Kostianoy, S. A. Lebedev, V. I. Mityagina, A. I. Ginzburg, N. A. Sheremet
Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas

The book summarizes the theoretical basis and an extensive experience of complex satellite monitoring of the ecological state of the Russian seas. The book is based on the results of satellite monitoring of the Baltic, Black, Azov and Caspian seas, conducted in 2004–2011 by a team of specialists from Russian Space Research Institute (Moscow), P. P. Shirshov Institute of Oceanology (Moscow, Russia) and Geophysical Center of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia) in cooperation with Marine Hydrophysical Institute (Sevastopol, Ukraine). Particular attention is paid to the results of operational monitoring of oil pollution in the area of Kravtsovskoe oil field in the southeastern Baltic sea (2004–2005) and a permanent multisensor satellite monitoring of the Black, Azov, Caspian and Baltic seas (2006–2011). Some aspects of regional climate change in the southern seas of Russia and peculiarities of meso- and small-scale water dynamics in the seas are shown. The experience of operational multisensor monitoring of oil catastrophes in the Kerch Strait (Black/Azov seas, 2007) and in the Gulf of Mexico (2010) is presented. The recommendations for organization of integrated satellite monitoring of the Russian seas are given.

The book is addressed to a wide range of experts in the field of remote sensing of the oceans and seas from space, oceanography, ecology, environmental protection, as well as professors, graduate students and students of higher educational institutions. The book will be interesting to oil and gas industry professionals who are engaged in the development of offshore oil and gas deposits, assessment of the impact on the environment, ecological monitoring during the design, construction and operation of ports, terminals, oil/gas platforms and pipelines at the shelves of the Russian seas. The book contains a lot of illustrations and an extensive list of references on various aspects of remote sensing from space.

УДК 528.88; 551.465; 551.463.8; 551.463.6; 528.873.044.1; 629.78

Редактор: *Егорова И. Н.*

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Дизайн обложки: *Давыдов В. М., Захаров А. Н.*

ISBN 978-5-9903101-1-7

© Учреждение Российской академии наук
Институт космических исследований РАН, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Цели и задачи спутникового мониторинга	15
Глава 2. Методы и средства спутникового мониторинга морской поверхности.	26
2.1. Спутниковая радиолокация морской поверхности	26
2.1.1. Основные сведения о радиолокаторах, используемых для аэрокосмического наблюдения океана.	26
2.1.2. Геометрия радиолокационной съемки	30
2.1.3. Радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR космического аппарата Envisat	31
2.1.4. Основные механизмы формирования радиолокационных изображений морской поверхности	35
2.1.5. Процессы и явления, проявляющиеся в радиолокационных изображениях морской поверхности	39
2.1.6. Основные принципы обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности при помощи спутниковой радиолокации.	41
2.1.7. Методы обработки радиолокационных изображений океана	44
2.2. Основы метода спутниковой альтиметрии	46
2.2.1. Развитие спутниковой альтиметрии	46
2.2.2. Геодезические и изомаршрутные программы	46
2.2.3. Геометрия метода.	52
2.2.4. Физические основы метода.	54
2.2.5. Поправки на влияние атмосферы.	61
2.2.6. Поправки на состояние подстилающей поверхности.	64
2.2.7. Геофизические поправки	65
2.2.8. Данные спутниковой альтиметрии	65
2.3. Основы метода спутниковой скаттерометрии.	67
2.3.1. Развитие спутниковой скаттерометрии.	68
2.3.2. Физические основы метода.	69
2.3.3. Геометрия обзора	73
2.3.4. Применение спутниковой скаттерометрии.	76
2.4. Спутниковое дистанционное зондирование океана в оптическом диапазоне	77
2.4.1. Исследования океана из космоса в видимом диапазоне спектра.	77
2.4.2. Исследования океана из космоса в инфракрасном диапазоне спектра.	81
2.4.3. Приборы, обеспечивающие наблюдения Земли в видимом и ИК-диапазонах	83
2.4.4. Примеры практического использования спутниковых данных оптического диапазона	92

2.5. Гидрометеорологическая информация	97
2.6. Специализированные спутники дистанционного зондирования Земли	110
2.6.1. ИСЗ ERS 1/2	110
2.6.2. ИСЗ Envisat	112
2.6.3. ИСЗ RADARSAT 1/2	114
2.6.4. ИСЗ TerraSAR-X	115
2.6.5. ИСЗ TOPEX/Poseidon	115
2.6.6. ИСЗ Jason 1/2	118
2.6.7. ИСЗ QuikSCAT	120
2.6.8. ИСЗ серии NOAA	121
2.6.9. ИСЗ MetOp	123
2.6.10. ИСЗ Terra и Aqua	125
2.6.11. ИСЗ серии Landsat	128
2.6.12. ИСЗ «Метеор-М» № 1	129
Глава 3. Оперативный комплексный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря (2004–2005)	131
Введение	131
3.1. Цели и задачи мониторинга	135
3.2. Методика проведения мониторинга	137
3.3. Гидрометеорологическая информация	144
3.4. Спутниковая информация о скорости ветра и высоте волн	152
3.5. Радиолокация нефтяного загрязнения Балтийского моря	160
3.5.1. Обоснование необходимости радиолокационного мониторинга и комплексного подхода	160
3.5.2. Методика обработки радиолокационных изображений	164
3.5.3. Проявление на радиолокационных изображениях сбросов нефтепродуктов с судов	166
3.5.4. Проявление на радиолокационных изображениях загрязнений, выносимых реками, каналами, течениями в проливах, утечек с береговых сооружений	176
3.5.5. Распознавание нефтяных пятен и их радиолокационных подобий естественного происхождения	178
3.6. Использование данных сканеров AVHRR и MODIS в процессе мониторинга нефтяных загрязнений	186
3.6.1. Данные AVHRR	186
3.6.2. Данные MODIS	190
3.7. Численное моделирование дрейфа нефтяных пятен	194
3.7.1. Прогноз дрейфа обнаруженных нефтяных пятен	194
3.7.2. Прогноз дрейфа нефтяных пятен с платформы Д-6	200
Заключение	204
Глава 4. Спутниковый мониторинг состояния и загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей (2006–2008)	207
4.1. Задачи мониторинга	208
4.2. Сенсоры, используемые для оперативной оценки экологической обстановки	209
4.3. Методика функционирования системы оперативного спутникового мониторинга	209

4.4. Антропогенные и биогенные загрязнения прибрежных акваторий российского сектора Черного и Азовского морей	224
4.4.1. Основные типы циркуляции, сопровождающиеся различным характером распределения загрязнений в прибрежной зоне в российском секторе Черного моря	225
4.4.2. Судовые загрязнения	226
4.4.3. Загрязнения береговыми стоками	235
4.4.4. Особенности загрязнения Азовского моря	235
4.4.5. Биогенные загрязнения	235
4.5. Особенности развития фитопланктона в северо-восточной части Черного моря	236
4.6. Экстремальные гидрометеорологические явления	238
4.7. Выводы и рекомендации	239
Глава 5. Многосенсорный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей (2009–2011)	241
5.1. Используемые данные	241
5.2. Районы проведения мониторинга	243
5.3. Результаты мониторинга	245
5.3.1. Внутренние волны в непривливых морях	245
5.3.2. Атмосферные гравитационные внутренние волны	272
5.3.3. Вихри и вихревые диполи	276
5.3.4. Мониторинг антропогенных загрязнений морской поверхности	291
5.3.5. Естественные загрязнения морской поверхности	302
5.3.6. Мониторинг ледяного покрова	316
5.4. Выводы	318
Глава 6. Динамика вод Черного и Каспийского морей по спутниковым наблюдениям	320
Введение	321
6.1. Черное море	321
6.1.1. Мезомасштабная динамика вод	322
6.1.2. Мелкомасштабные вихри	332
6.2. Каспийское море	336
6.2.1. Циклонический круговорот в Среднем Каспии	340
6.2.2. Апвеллинг у западного и восточного побережий	341
6.2.3. Струйные потоки из Северного и Южного Каспия в Средний Каспий	355
6.2.4. Вихревая динамика	355
6.2.5. Области холодных вод в Южном Каспии	357
6.2.6. Особенности пространственного распределения хлорофилла- <i>a</i> в связи с апвеллингом и вихревыми структурами	358
Заключение	359
Глава 7. Климатические изменения основных параметров южных морей России по данным дистанционного зондирования	361
7.1. Физико-географические особенности	361
7.1.1. Каспийское море	362
7.1.2. Азовское море	363
7.1.3. Черное море	364

7.2. Данные и методика анализа изменчивости уровня морей	364
7.2.1. Современные вертикальные движения земной коры	365
7.2.2. Дистанционные измерения уровня морей	365
7.2.3. Методика обработки данных	367
7.3. Пространственно-временная изменчивость уровня южных морей	368
7.3.1. Каспийское море	368
7.3.2. Азовское море	373
7.3.3. Черное море	374
7.4. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхностного слоя южных морей	378
7.4.1. Используемые данные и регионы исследования	378
7.4.2. Каспийское море	382
7.4.3. Азовское море	388
7.4.4. Черное море	390
7.5. Выводы	391
Глава 8. Мониторинг катастрофических разливов нефти	393
Введение	393
8.1. Катастрофический разлив нефтепродуктов в Керченском проливе 11 ноября 2007 г.	396
8.1.1. Экстремальные метеорологические условия, вызвавшие гибель судов	399
8.1.2. Хроника катастрофы	400
8.1.3. Результаты обследований МЧС России и Украины в Керченском проливе 12–16 ноября 2007 г.	401
8.1.4. Спутниковый мониторинг Керченского пролива в ноябре 2007 г.	403
8.1.5. Спутниковый мониторинг Керченского пролива летом 2008 г.	409
8.1.6. Результаты натурных наблюдений на косе Тузла	414
8.1.7. Выводы и рекомендации	416
8.2. Спутниковый мониторинг катастрофического разлива нефти в Мексиканском заливе в апреле-августе 2010 г.	416
Заключение	438
Список сокращений	443
Литература	448

ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние морей России вызывает обоснованную озабоченность специалистов (*Патин*, 2001; *Зацепин*, *Флинт*, 2002; *Kostianoy*, *Kosarev*, 2005; 2008). Это обусловлено многими причинами.

За последние 10 лет в Балтийском, Баренцевом, Черном, Каспийском и Охотском морях произошло расширение деятельности нефтегазовой отрасли по транспортировке и экспорту углеводородов и других грузов через порты России, что вызвало строительство новых нефтеналивных терминалов и увеличение интенсивности судоходства, в том числе движения танкеров. Это приводит к увеличению рисков загрязнения окружающей среды нефтепродуктами в результате «хронического» загрязнения морей и аварий судов. Судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону морей, что является причиной 45 % нефтяного загрязнения океана (*Patin*, 1999; *Израэль*, *Цыбань*, 2009).

С начала 2000-х гг. началась программа широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на морском шельфе России. Она сопровождается строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами. Помимо нефтяного загрязнения, взвешенные вещества поступают в море в результате производственной деятельности на акватории моря и на берегу: прокладки трубопроводов, кабелей, дампинга, взрывов на дне и пр. Большое количество взвешенного вещества прибывает со стоком рек, в результате выноса вод из заливов, образуется в результате вертикального перемешивания при сильном волнении на мелководье. Все это приводит к вторичному загрязнению вод, увеличению мутности, снижению фотоактивной радиации, биопродуктивности, изменению структуры популяций, гибели бентоса.

В результате эвтрофикации вод (обогащение морей биогенами) и регионального изменения климата в ряде морей России начали происходить процессы, приводящие к аномальному цветению вод в тех районах, где это ранее не наблюдалось. Эвтрофикация поверхностных вод окраинных и внутренних морей, объясняемая главным образом избытком питательных веществ (фосфора и азота), является важной проблемой, которая с каждым годом становится острее. Бурное цветение сине-зеленых водорослей (многие из них токсичны) с каждым годом охватывает все большие площади.

В начале 1990-х гг. кардинально изменилась геополитическая обстановка в Балтийском, Черном, Азовском и Каспийском морях. В связи с распадом СССР на берегах этих морей появились новые независимые государства. Практически полностью прекратился обмен данными с бывшими советскими республиками, скоординированных работ в море не проводится, а на работы в территориальных водах сопредельных государств требуется получение специальных разрешений. За последние 20 лет

значительно уменьшился объем регулярных гидрологических работ в море, проводимых различными научными организациями России, а также объем информации с метеостанций и уровенных постов Росгидромета. Так, например, в начале 1990-х гг. регулярный авиационный контроль нефтяных загрязнений морей России практически прекратился. В российском секторе юго-восточной Балтики и в Финском заливе он не выполняется с 1993 г. Круглогодичный мониторинг нефтяных загрязнений в Баренцевом, Черном, Азовском, Каспийском, Японском и Охотском морях в настоящее время также не проводится.

Экологическими службами портов, терминалов и оперирующими компаниями делается все возможное для исключения попадания нефтепродуктов в морскую среду, однако это касается только акваторий соответствующих портов. Постоянный и оперативный мониторинг нефтяного загрязнения вод за пределами этих акваторий не проводится (за исключением побережья Балтийского моря Калининградской области). Имеющиеся данные показывают, что именно там и происходит нелегальный сброс нефтепродуктов в море с танкеров и других типов судов (сухогрузов, контейнеровозов, химовозов, рыболовецких, пассажирских и военных кораблей), который никем не контролируется.

В настоящее время никак не учитывается загрязнение морей России в результате трансграничного переноса течениями с акваторий сопредельных государств, и наоборот — вод сопредельных государств с акваторий России. Такая проблема в явном виде существует как в Финском заливе и в юго-восточной части Балтийского моря, так и в Черном, Азовском, Каспийском, Баренцевом, Японском и Охотском морях.

Поэтому современное термогидродинамическое и экологическое состояние морей России, а также тенденции их эволюции в целом известны плохо. Следовательно, организация комплексного спутникового мониторинга морей России и, в частности, районов добычи на шельфе и транспортировки углеводородов стала еще более актуальной задачей.

Составной частью любой программы современного мониторинга экологического состояния суши или морей является спутниковый мониторинг, который обладает большими возможностями и преимуществами по сравнению с наземными средствами. Это: глобальное покрытие земного шара; мгновенная съемка обширных акваторий; наивысшая оперативность в получении данных; возможность ежедневного повтора наблюдений; высокое пространственное разрешение (от 1 км до 50 см); получение комплексных и мультисенсорных данных; возможность организации оперативного комплексного мониторинга в любой точке Мирового океана; использование тех же спутниковых данных для решения широкого круга вспомогательных и дополнительных задач мониторинга суши (пожары, наводнения, опустынивание, вегетация, водные ресурсы и пр.); существенно более низкая стоимость спутникового мониторинга по сравнению с морскими наблюдениями.

За последние 20 лет в ходе выполнения ряда российских и международных проектов Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Геофизический центр РАН (ГЦ РАН) совместно с Морским гидрофизическим институтом Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ) накопили уникальный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей и океанов, разработали и отработали новые методики исследований, которые применяются для комплексного мониторинга экологи-

ческого состояния морей России. Спутниковые методы наряду с анализом гидрологических данных позволяют с высоким пространственно-временным разрешением регулярно получать необходимые термогидродинамические, оптические и метеорологические параметры одновременно на всей акватории моря, а не только в его российском секторе.

Был разработан эффективный комплексный (мультисенсорный и междисциплинарный) подход к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей России (*Костяной* и др., 2009). Впервые такой подход был реализован на практике для района юго-восточной Балтики, где в 2004–2005 гг. по контракту с ООО «Лукойл-Калининградморнефть» под руководством проф. А. Г. Костяного (ИО РАН) была фактически создана служба мониторинга нефтяного загрязнения, которая работала в оперативном режиме круглосуточно в течение 18 месяцев (гл. 3). Впоследствии, аналогичный комплексный подход был применен к Азово-Черноморскому бассейну (гл. 4 и 5). Результаты, полученные в 2004–2011 гг., показали эффективность комплексного спутникового мониторинга экологического состояния Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей.

Спутниковый мониторинг прибрежных районов океана и внутренних морей — важнейший метод контроля их экологического состояния. Он основан на приеме цифровых данных с различных радиометров, сканеров, спектрометров, радаров, альтиметров, скаттерометров, установленных на зарубежных и российских спутниках (NOAA, Terra, Aqua, TOPEX/Poseidon, Jason 1/2, GFO, Envisat, RADARSAT 1/2, TerraSAR-X, ERS-2, QuikSCAT, Landsat, IRS, KOMPSAT-2, EROS A, IKONOS, SPOT, QuickBird, FORMOSAT-2, «Метеор-М» № 1 и многих других) и позволяющих получать информацию о поле температуры поверхности моря (ТПМ), взеси, концентрации хлорофилла, других оптических характеристиках водной поверхности и суши, нефтяном загрязнении, а также об аномалиях уровня моря, ледовом покрытии, изменчивости течений, скорости ветра и высоты волн с высоким пространственным и временным разрешением.

Например, радары с синтезированной апертурой (РСА), установленные на спутниках Envisat, RADARSAT 1/2, ERS-2 и TerraSAR-X являются незаменимым средством для мониторинга нефтяных загрязнений океанов и морей. Анализ получаемой информации позволяет оперативно отслеживать экологическую обстановку на акватории, подверженной воздействию стоков различной природы, оценивать площадь и степень ее загрязненности и исследовать физические процессы, определяющие перенос загрязнений по изучаемым акваториям, а иногда и определять виновников нефтяного загрязнения. Возможность обзора в короткие сроки огромных акваторий, а также повторных наблюдений одного и того же региона с небольшим интервалом времени делают использование космической информации наиболее дешевым, оперативным и объективным методом экологического мониторинга морей и океанов.

Еще один пример — высокое содержание взеси и интенсивное цветение фитопланктона может быть обусловлено как естественными факторами (сток рек, вынос из лагун и лиманов), так и антропогенным воздействием (сбросы промышленных предприятий, смыв удобрений с полей). Поскольку вспышки цветения фитопланктона являются наиболее очевидным следствием эвтрофикации, данные спутниковых наблюдений (например, сканирующих спектрорадиометров MODIS и MERIS) имеют

огромное преимущество для экологического мониторинга морей по сравнению с судовыми наблюдениями.

Благодаря прогрессу в технологиях дистанционного зондирования океана из космоса стало возможным исследование различных типов мезомасштабных и мелкомасштабных вихрей и струй, представляющих собой не только механизм переноса загрязнений, но и эффективный процесс «самоочищения» прибрежных вод от загрязнений различной природы, а также механизма переноса вод, нитратов и планктона из прибрежных зон в сторону открытого океана (моря), значительно влияющий на биопродуктивность удаленных от берега районов (гл. 5 и 6).

В последние годы с появлением доступных банков глобальной регулярной спутниковой информации и данных реанализа о поле температуры поверхности моря, уровне моря, концентрации хлорофилла, ледовом покрытии, атмосферном давлении, ветре, осадках, влажности, потоках тепла и других гидрометеорологических характеристиках (PODAAC JPL, AVISO, UT/CSR, NCEP, GSFC DAAC и др.), появилась возможность изучения не только сезонной, но и межгодовой изменчивости состояния акваторий морей России. Это особенно важно как для изучения изменчивости регионального климата, так и эволюции термогидродинамического и экологического состояния морей (гл. 7).

Основные цели и задачи выполняемых работ по спутниковому мониторингу морей России направлены на реализацию основных положений Экологической доктрины Российской Федерации № 1225-р, одобренной распоряжением Правительства Российской Федерации 31 августа 2002 г., Морской доктрины Российской Федерации на период до 2020 г. № Пр-1387, утвержденной Президентом Российской Федерации 27 июля 2001 г., и протокола совещания в Правительстве Российской Федерации № ВП-П7-26пр от 21 октября 2008 года по вопросу «О ходе реализации приоритетных задач отечественной космической деятельности и расширении сферы использования возможностей космических средств в интересах социально-экономической деятельности регионов страны», предусматривающих, в том числе, проведение комплексных морских научных исследований в интересах Российской Федерации, развитие систем мониторинга за состоянием морской природной среды и прибрежных территорий.

В частности, этим протоколом обращается внимание Роскосмоса, Минэкономразвития России, Минрегиона России, Минтранса России и других заинтересованных федеральных органов исполнительной власти на необходимость более эффективного внедрения результатов космической деятельности в различные отрасли экономики Российской Федерации и обеспечения их доступности широкому кругу потребителей. Таким образом, разработка научных основ новых технологий, развития методик космического мониторинга и создание на их базе системы оперативного спутникового контроля состояния и загрязнения российских морей сегодня крайне актуальна.

Эти задачи успешно решаются учеными ведущих институтов Российской академии наук (в том числе авторами данной книги), проводящих исследования морей и океанов методами дистанционного зондирования из космоса. Ими активно разрабатываются новые методы и технологии, позволяющие использовать результаты космической деятельности для решения широкого круга научных, экологических и природопользовательских задач. Полученные авторами результаты уже в настоящий

момент востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов и МЧС РФ. Область же применения отдельных решений и разработанных методик и алгоритмов, значительно шире.

Дистанционное зондирование Земли из космоса в последние годы претерпевает бурное развитие, что связано с двумя факторами. Во-первых, эта область космических технологий является второй, после космической связи, где предвидится существенный коммерческий потенциал. Во-вторых, осознанная в последние годы проблема антропогенного влияния на Мировой океан требует создания глобальной сети мониторинга поверхности океана и приподного слоя атмосферы, ключевым элементом которой являются космические средства наблюдения. Значительные финансовые и технические ресурсы, требуемые для развития такой сети, диктуют необходимость широкой международной кооперации. Для того чтобы войти в эту кооперацию, причем не в качестве только потребителя услуг, необходимо опережающее развитие в России новых технологий и средств дистанционного зондирования.

Существенный вклад в создание и внедрение автоматизированных информационных систем дистанционного мониторинга внесли специалисты ИКИ РАН. В Институте активно разрабатываются методы и технологии, позволяющие использовать результаты космической деятельности для решения научных и народнохозяйственных задач (Луян и др., 2011а). Доведены до практического применения проекты по созданию территориальных и проблемно-ориентированных информационных систем с использованием спутниковых данных для Рослесхоза (Абушенко и др., 2000; Егоров и др., 2006; Коровин и др., 2010), Росгидромета (Бурцев и др., 2009), Росрыболовства (Нестеренко и др., 2004), Министерства сельского хозяйства РФ (Луян и др., 2009; 2011б). Созданные технологии обеспечивают контроль над состоянием природных ресурсов на территории России и управление процессами, связанными с их охраной и использованием.

Актуальные вопросы спутникового мониторинга морей и океанов постоянно рассматриваются на Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», которая с 2003 г. ежегодно проводится Институтом космических исследований РАН при поддержке Российской академии наук и Федерального космического агентства (http://d33.infospace.ru/d33_conf/). С 2004 г. конференция получила название открытой, так как в ее работе принимают участие не только российские ученые, но и специалисты из ведущих научных центров Украины, Белоруссии, Казахстана, Азербайджана, Грузии, а также США, Великобритании, Германии, Испании, Португалии, Монголии, Болгарии и других стран. Программный комитет конференции возглавляет вице-президент РАН академик Н. П. Лаверов. В работе конференции ежегодно принимают участие свыше 400 ученых из более 100 российских и зарубежных организаций.

Начиная с первой конференции, авторы книги являются организаторами и активными участниками этого Всероссийского научного мероприятия, которое в России стало ведущим в области дистанционного зондирования Земли из космоса. Наибольшее число докладов традиционно представляется на научной секции «Дистанционные исследования океана и ледяных покровов», на которой, в частности, неоднократно отмечалось, что дистанционное зондирование Мирового океана из космоса достигло высокого уровня и является в настоящий момент мощным методом исследования океана. Большой объем накопленных за последнее десятилетие

данных дает возможность выявлять глобальные межгодовые и сезонные изменения климатически значимых параметров океана по спутниковым данным. Сложившаяся кооперация ученых из ИКИ РАН, ИО РАН, ГЦ РАН, МГИ НАНУ и др., занимающихся проблемами экологического мониторинга, могла бы составить группу, в задачи которой входили бы оперативная обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и оперативное доведение этой информации до структур, принимающих решения.

Очередным признанием высокого научного уровня конференции стало преобразование ежегодного сборника трудов конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» во Всероссийское периодическое издание под тем же названием, которое с 2011 г. включено в Перечень ведущих периодических изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации (список ВАК).

С 2005 г. в рамках конференции проводится Школа молодых ученых, во время которой ведущие российские и зарубежные ученые читают обзорные лекции по актуальным проблемам развития методов и систем дистанционного зондирования Земли и использования технологий спутникового мониторинга Земли для решения фундаментальных и прикладных задач.

Большой интерес студентов, аспирантов и молодых специалистов, участников Школы молодых ученых, вызывает проблема комплексного спутникового мониторинга морей и океанов. Летом 2010 г. авторы книги, при всесторонней поддержке ИКИ РАН, инициировали новое научное мероприятие для молодых ученых — выездную школу-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» в Тарусе Калужской области на базе гостиницы «Интеркосмос» ИКИ РАН.

Первая школа-семинар по теме «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования» состоялась 9–12 июля 2010 г., вторая — «Изучение внутренних водоемов дистанционными методами» — 15–20 февраля 2011 г. Материалы выездной Школы-семинара доступны на веб-сайте ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/earth/index.htm>).

Многолетний совместный опыт работы по спутниковому мониторингу, организация и участие во Всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и в выездной школе-семинаре «Спутниковые методы и системы исследования Земли» в Тарусе привели нас к мысли о необходимости объединения усилий в написании книги о результатах работ по комплексному спутниковому мониторингу морей России. За последние 20 лет в России и за рубежом было опубликовано большое количество книг и специальных технических отчетов о спутниках, приборах, методах дистанционного зондирования Земли из космоса, калибровочных экспериментах, сравнении спутниковых данных с данными подспутниковых экспериментов, результатами модельных расчетов и др. Однако книг о результатах многолетнего спутникового мониторинга морей России оказалось не так много.

Именно в Тарусе сформировалась концепция книги, которая предлагается вашему вниманию. Она состоит из восьми глав, сконцентрированных на мониторинге Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, — и в частности, на экологических аспектах. **Глава 1** посвящена целям и задачам спутникового мониторинга

морей России. Во **второй главе** описываются основы различных спутниковых методов и средства ДЗЗ, приборы и спутники, которые наиболее часто используются для сбора разнообразной информации с поверхности моря. В **третьей главе** приводятся результаты оперативного комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения в районе Кравцовского нефтяного месторождения в юго-восточной части Балтийского моря, который проводился в 2004–2005 гг. Позже этот уникальный опыт был перенесен на Азово-Черноморский бассейн, поэтому в **четвертой главе** описывается экологическое состояние и степень загрязнения российских секторов Черного и Азовского морей по спутниковым данным за 2006–2008 гг. С 2009 г. нам предоставлена возможность доступа к данным регулярных радиолокационных наблюдений со спутников Envisat и ERS-2 акваторий Черного, Каспийского и Балтийского морей, что обеспечило возможность постоянного мониторинга нефтяного загрязнения, мезо- и мелко-масштабной динамики вод этих морей. Результаты многосенсорного спутникового мониторинга Черного, Каспийского и Балтийского морей за 2009–2011 гг. приведены в **пятой главе**. В **шестой главе** изложены основные сведения о вихревой динамике вод Черного и Каспийского морей, которая существенным образом влияет на перераспределение загрязняющих веществ по их акваториям.

Достаточно длинные ряды спутниковых наблюдений позволяют исследовать некоторые аспекты регионального изменения климата. Одними из основных параметров климатической изменчивости морей и океанов являются температура поверхности и их уровень. В **седьмой главе** приведены данные о межгодовой изменчивости этих параметров для Черного, Азовского и Каспийского морей. Авторы книги внесли свой вклад в мониторинг морских катастроф в Керченском проливе в 2007 г. и в Мексиканском заливе в 2010 г., которые сопровождались катастрофическими разливами нефти. При ограниченных ресурсах удалось провести оперативный многосенсорный мониторинг развития ситуации в обоих случаях на протяжении несколько месяцев и получить ряд интересных результатов. Поэтому **восьмая глава** посвящена этому важному опыту оперативного мониторинга объектов, находящихся на значительном расстоянии от центров получения, сбора и анализа спутниковой информации. В заключении даются основные выводы из многолетнего опыта работы авторов по комплексному спутниковому мониторингу морей России.

Авторы выражают глубокую благодарность руководству ИКИ РАН за финансовую поддержку издания данной книги и выездной школы-семинара в Тарусе. Особая благодарность адресована *Комаровой Н. Ю.* (ИКИ РАН) за подготовку рукописи книги к печати.

В течение последних 20 лет в работе над решением различных задач спутникового мониторинга морей России принимало участие большое число наших коллег из разных организаций России, ближнего и дальнего зарубежья. Сотрудничество с ними в рамках российских национальных и европейских международных проектов было чрезвычайно плодотворно, а их помощь неоценима. В связи с этим мы хотели бы выразить особую признательность и благодарность следующим лицам и организациям:

Бочаровой Т. Ю., Каримовой С. С., доктору технических наук Лупяну Е. А., кандидату физико-математических наук Мазурову А. А., кандидату биологических наук Строчкову А. Я., доктору физико-математических наук, профессору Шаркову Е. А. (Институт космических исследований РАН, Москва, Россия);

доктору физико-математических наук *Зацепину А. Г.*, кандидату географических наук *Сироте А. М.* (Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия);

доктору физико-математических наук, профессору *Сабину К. Д.*, доктору физико-математических наук *Серебряному А. Н.* (ФГУП «Акустический институт им. акад. Н. Н. Андреева», Москва, Россия);

доктору физико-математических наук *Троицкой Ю. И.*, доктору физико-математических наук *Ермакову С. А.*, кандидату физико-математических наук *Сергиевской И. А.* (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия);

кандидату физико-математических наук *Кровотынцеву В. А.* и сотрудникам отдела обработки спутниковой информации НИЦ «Планета», Москва, Россия;

кандидату географических наук *Кривошее В. Г.* (Южное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия);

кандидату физико-математических наук *Литовченко К. Ц.* (Концерн «РТИ Системы», Москва, Россия);

кандидату физико-математических наук *Станичному С. В.*, *Соловьеву Д. М.* (Морской гидрофизический институт НАНУ, Севастополь, Украина);

члену-корреспонденту НАНА, доктору географических наук *Мамедову Р.* (Институт географии НАНА, Баку, Азербайджан);

Dr. *Cecilia Ambjorn* (SMHI, Norrköping, Sweden);

Dr. *Val Byfield* (NOCS, Southampton, UK);

Dr. *J. Da Silva* (University of Lisbon, Portugal);

Dr. *Martin Gade* (Hamburg University, Germany);

Prof. *Jacques Nihoul* и Dr. *Salim Djenidi* (Liege University, Belgium).

За прошедшие годы авторам удалось существенно продвинуться в области дистанционного зондирования океанов и морей и комплексного спутникового мониторинга морей России благодаря финансовой поддержке следующих организаций, которым авторы выражают глубокую благодарность (в алфавитном порядке): Министерство образования и науки РФ; Министерство экономического развития РФ; Росгидромет; Российская академия наук; Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ); Commission of the European Communities; (INTAS).

Особую благодарность авторы выражают Европейскому космическому агентству за данные спутниковой радиолокации высокого разрешения, предоставленные в рамках ряда научных проектов.

Мы надеемся, что эта книга будет интересной и полезной широкому кругу специалистов в области дистанционного зондирования океанов и морей из космоса, океанографии, экологии, защиты окружающей среды, а также преподавателям, аспирантам и студентам профильных высших учебных заведений. Книга адресована также специалистам нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей России.

Глава 1

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Необходимость выявлять антропогенные изменения природной среды потребовала организации специальной информационной системы наблюдения и анализа ее состояния, в первую очередь загрязнений и эффектов, вызываемых ими в биосфере. Именно такую систему в 1974 г. Ю.А. Израэль предложил называть мониторингом состояния природной среды, а точнее, мониторингом антропогенных изменений окружающей природной среды. В него включаются в качестве основных элементов наблюдения за факторами воздействия и состоянием окружающей среды, прогноз ее будущего состояния и оценка фактического и прогнозируемого состояния природной среды (*Израэль, 1979*).

Понятие мониторинга в настоящее время используется в самых различных областях деятельности, поэтому смысл, вкладываемый в него, широко варьируется. Обычно под мониторингом подразумевается регулярная система наблюдений, имеющая целью получение информации, необходимой для осуществления и планирования тех или иных видов деятельности. Основой мониторинга, как правило, является программа, определяющая перечень наблюдаемых показателей, порядок производства наблюдений, содержание создаваемой информационной продукции. Опыт, накопленный в различных областях деятельности, показывает, что при формировании программы мониторинга в обязательном порядке должны учитываться несколько обстоятельств. Во-первых, это правовые основы мониторинга как общественно значимой информационной системы. Во-вторых, — цели и задачи мониторинга, в которых отражено назначение информации, являющейся основной продукцией этой системы. В-третьих, — специфические особенности, присущие явлениям и процессам, выступающим в качестве объекта наблюдений.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 219 от 10.04.2007 г. «Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов» (в ред. Постановлений Правительства РФ от 22.04.2009 г. № 351, от 17.10.2009 г. № 830), организация и осуществление мониторинга проводятся Федеральным агентством водных ресурсов, Федеральным агентством по недропользованию, Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с участием уполномоченных органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

Согласно Постановлению, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды при осуществлении мониторинга поверхностных водных объектов:

- осуществляет регулярные наблюдения за состоянием поверхностных водных объектов в части количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов, внутренних морских вод и территориальных морей Российской Федерации, континентального шельфа и исключительной экономической зоны Российской Федерации на базе государственной наблюдательной сети (в ред. Постановления Правительства РФ от 22.04.2009 № 351);
- проводит оценку и прогнозирование изменений состояния поверхностных водных объектов в части количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов;
- обеспечивает сбор, обработку, обобщение и хранение сведений, полученных в результате наблюдений за водными объектами, и представление в Федеральное агентство водных ресурсов данных мониторинга поверхностных водных объектов с учетом данных мониторинга, осуществляемого при проведении работ в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, в соответствии с установленными формами и порядком представления данных, а также порядком информационного обмена;
- обеспечивает предоставление федеральным органам исполнительной власти, органам государственной власти субъектов Российской Федерации, органам местного самоуправления, а также юридическим и физическим лицам данных мониторинга поверхностных водных объектов в порядке, установленном Федеральным законом «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

Основные функции в области фонового мониторинга окружающей природной (в том числе морской) среды традиционно были сосредоточены исключительно у специально уполномоченных на то государственных органов. Это нашло отражение во введенном в действие в 2002 г. Законе РФ «Об охране окружающей среды»: «Государственный мониторинг окружающей среды (государственный экологический мониторинг) осуществляется в соответствии с законодательством Российской Федерации и законодательством субъектов Российской Федерации в целях наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе за состоянием окружающей среды в районах расположения источников антропогенного воздействия и воздействием этих источников на окружающую среду, а также в целях обеспечения потребностей государства, юридических и физических лиц в достоверной информации, необходимой для предотвращения и (или) уменьшения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды».

В последующем развитие законодательства в этой сфере было связано с конкретизацией различных видов экологического мониторинга, а также с расширением прав и обязанностей хозяйствующих субъектов по его проведению. Наряду с осуществлением мониторинга источников антропогенного воздействия предприятия стали привлекаться к выполнению других видов экологического мониторинга.

В соответствии с Водным кодексом РФ (2006) и Постановлением Правительства РФ № 219 от 10.04.2007 «Об утверждении Положения об осуществлении государ-

ственного мониторинга водных объектов» (в ред. Постановлений Правительства РФ от 22.04.2009 № 351, от 17.10.2009 № 830), мониторинг включает в себя:

- регулярные наблюдения за состоянием водных объектов, количественными и качественными показателями состояния водных ресурсов, а также за режимом использования водоохраных зон;
- сбор, обработку и хранение сведений, полученных в результате наблюдений;
- внесение сведений, полученных в результате наблюдений, в государственный водный реестр;
- оценку и прогнозирование изменений состояния водных объектов, количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов.

Существенно расширились понятия о целях, задачах и субъектах реализации фоновый мониторинга морской природной среды. Перечень нормативно-законодательных документов, регламентирующих деятельность по организации и проведению такого мониторинга, представлен в отчете (*Костяной и др., 2010б*).

Функциональной основой комплексного фоновый (климатического) мониторинга природной среды морей России является морская наблюдательная система Росгидромета, предназначенная для определения характеристик состояния природной среды морей России и являющаяся составной частью государственной наблюдательной сети.

Морская наблюдательная система — комплекс наблюдений, проводимых с различных наблюдательных платформ унифицированными средствами измерений на основе единой нормативно-методической и правовой базы.

Эта система включает в себя наземную и космическую подсистемы. В состав наземной входят: сеть морских береговых и устьевых гидрометеорологических наблюдений; сеть добровольных и штатных судовых наблюдений; сеть океанографических наблюдений и работ; сеть автоматических буйковых станций — заякоренных и дрейфующих, сеть общегосударственной службы наблюдений за загрязнением морей. В состав космической подсистемы входит группа российских и зарубежных метеорологических и специализированных спутников, позволяющих делать снимки земной поверхности из космоса, определять уровенную поверхность под маршрутами пролета, температуру воды, содержание взвеси и хлорофилла в поверхностном слое, ряд других гидрометеорологических параметров, а также центры по приему и обработке космической информации.

Основу морской наблюдательной сети морей России составляют стационарные и подвижные пункты наблюдения за состоянием морской природной среды, размещенные на морском побережье, островах, в устьях рек и в открытом море. Они предназначены для получения информации о явлениях и процессах, протекающих в прибрежной зоне моря, на поверхности и в глубинных слоях, о взаимодействии морских процессов с атмосферными процессами, а также для оценки степени загрязнения морской среды.

Основными задачами функционирования морской наблюдательной сети Росгидромета являются:

- проведение регулярных морских метеорологических, морских гидрометеорологических, устьевых, океанографических и специальных гидрометеорологических наблюдений и наблюдений за загрязнением морской среды на основе

- принципов непрерывности (с учетом заданной дискретности), единства и сопоставимости методов наблюдений, сбора, обработки, хранения и распространения полученной в результате наблюдений информации;
- выполнение наблюдений за опасными и стихийными гидрометеорологическими явлениями в морях России;
 - проведение первичной обработки результатов всех наблюдений (в том числе и анализа проб воды), передачи в установленном порядке текущей, оперативной и экстренной информации в определенном формате в заданные адреса в соответствии с планом и схемой информационной работы;
 - обеспечение информацией о состоянии морской природной среды морей России органов государственной власти, Вооруженных Сил Российской Федерации, а также населения;
 - обеспечение государственных органов экстренной информацией о возникновении и развитии опасных и стихийных морских гидрометеорологических явлений, об экстремальных уровнях загрязнения морской среды морей России, в том числе обеспечение специальной информацией при проведении аварийно-спасательных работ и мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера на морском побережье и в устьях рек.

Полученная в результате функционирования морской наблюдательной сети информация о состоянии природной среды морей России в виде гидрометеорологических, ледовых, океанографических и других данных, используется в обслуживании информационных потребностей различных областей экономики, военно-морского флота, морского транспорта, рыбного промысла, разведки и эксплуатации морских месторождений нефти и газа, проектирования и строительства морских гидротехнических сооружений.

Морская наблюдательная сеть является также базой экспериментальных наблюдений, опытной эксплуатации новых технических средств измерений, апробации новых методик наблюдений, подготовки специалистов по морской гидрометеорологии и океанографии.

Кроме того, для мониторинга морей России применяются летательные и космические аппараты (КА). Летательные аппараты используются для океанографических наблюдений и работ для быстрого получения данных о распределении на больших акваториях температуры поверхности моря с помощью радиометров, морских льдов с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛСБО), для аэрофотосъемок волнения, исследования циркуляции и переносов вод, профилей водной поверхности в прибрежной зоне моря (с применением лазерного профилографа), признаков загрязнения вод.

Космические аппараты находят широкое применение в практической океанографии для получения информации о распределении температуры поверхности моря, морских льдов, динамики вод, вихревых структур, взвесей, фитопланктона, нефтяных загрязнений и др. Спутниковая альтиметрия позволяет получать продольные профили уровня поверхности моря и осуществлять мониторинг изменений уровня моря. Использование метода спутниковой геодезии на основе глобальной системы позиционирования GPS позволяет при наблюдениях уровня моря учитывать верти-

кальные движения земной коры и обеспечивать привязку уровенных наблюдений к единой высотной основе.

Однако в настоящее время комплексные фоновые мониторинговые наблюдения природной среды морей России в условиях резкого уменьшения государственного финансирования в значительной степени сократились. Авиационные и космические средства практически не используются из-за отсутствия современных специально оборудованных летательных аппаратов и отечественных природно-ресурсных спутников. По словам бывшего руководителя Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды А. И. Бедрецкого: «...сегодня мы пользуемся только зарубежными спутниками, причем отслеживать нефтяные загрязнения в оперативном режиме мы не можем...» (Интернет-конференция в Центре информационных технологий компании «Гарант» 18 августа 2008 г., <http://www.garant.ru/action/conference/10079/>).

В то же время европейские страны проводят регулярный мониторинг экологического состояния и нефтяных загрязнений в Средиземном, Северном и Балтийском морях с помощью специально оборудованных самолетов, кораблей и спутников.

Поскольку регулярного воздушного контроля нефтяного загрязнения морей России давно не проводится, то спутниковый мониторинг для Российской Федерации является основным методом контроля морской среды за пределами портов и нефтяных терминалов. Он позволяет ежедневно отслеживать появление нефтяных загрязнений на обширной акватории одновременно, включая территориальные воды сопредельных стран, что особенно важно в случае трансграничного переноса загрязнений течениями. Ежедневный и оперативный мониторинг позволяет достаточно часто выявлять виновников загрязнения и отличать так называемые «чужие» загрязнения от «собственных», что крайне важно вблизи морских границ сопредельных государств. Проблемы в корректном детектировании нефтяных пятен на морской поверхности минимизируются благодаря комплексному (мультисенсорному и междисциплинарному) подходу к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей, включающему совместный анализ разнообразной спутниковой, океанографической и метеорологической информации. И, наконец, комплексный подход подразумевает прогноз дрейфа и трансформации нефтяных пятен, что требует наличия специализированных оперативных численных моделей. Впервые в России такой комплексный подход был реализован авторами на практике для мониторинга добычи нефти на Кравцовском нефтяном месторождении в юго-восточной части Балтийского моря в 2004–2005 гг. (см. гл. 3).

Спутниковые методы широко и активно используются для мониторинга Мирового океана и в настоящее время играют важную роль в создаваемой Глобальной системе наблюдения за океаном (ГСНО) (UNESCO, 2003). Наиболее информативным методом для решения задач дистанционного исследования поверхности Земли из космоса является использование и тематический анализ изображений, полученных установленными на космических аппаратах и работающими в разных частотных диапазонах приборными комплексами. Ряд спутников, оснащенных приборами дистанционного зондирования (радиолокаторами, скаттерометрами, радиометрами и оптической техникой), выведены на орбиту специально для получения разносторонней геофизической информации, необходимой для оценки состояния окружающей среды и для природо-ресурсных исследований.

Активные и пассивные сенсоры способны детектировать видимую, инфракрасную и микроволновую области электромагнитного спектра, которые используются для измерения четырех основных параметров океанов и морей: цвета, температуры, высоты и шероховатости морской поверхности. Измерения этих параметров позволяют извлечь следующую информацию (более подробно это изложено в гл. 2):

- микроволновые сенсоры (альтиметры, скаттерометры, радары с синтезированной апертурой) используются для определения высоты морской поверхности, уровня океанов и морей, высоты волн, скорости приводного ветра, наблюдения за ледяным покровом и нефтяным загрязнением. Микроволновая радиометрия позволяет определять солёность поверхностных вод, однако, пока еще с точностью, не достаточной для решения большинства задач в океанографии;
- цветковые сканеры определяют спектральные свойства радиации, восходящей с водной поверхности, которая несет информацию о различных оптических характеристиках поверхностного слоя океана — прозрачности вод, концентрации взвешенного вещества, содержании хлорофилла, цветении вод и пр. Оптический диапазон позволяет наблюдать скопления и кромку льда, айсберги, и при определенных условиях — нефтяные загрязнения;
- инфракрасные и микроволновые сенсоры используются для измерения температуры поверхности океана/моря (ТПО/ТПМ). В отличие от инфракрасных радиометров и оптических сканеров, пассивные микроволновые сенсоры могут измерять поле ТПО в условиях сплошной облачности, правда с меньшей точностью и пространственным разрешением. Инфракрасные радиометры позволяют также наблюдать скопления и кромку льда.

Область применения данных дистанционного зондирования, получаемых со спутников, применительно к морям и океанам, чрезвычайно широка и далеко не исчерпывается приведенным ниже списком:

- широкий круг задач в области охраны окружающей среды;
- мониторинг уровня и динамики вод различных частей морей и океанов;
- мониторинг экологического состояния территорий и акваторий в районах добычи, переработки, транспортировки нефти и газа, других полезных ископаемых;
- контроль береговых зон, наблюдение за судами, выявление и отслеживание нефтяных загрязнений;
- текущий контроль строительства объектов инфраструктуры транспортировки и добычи нефти и газа и оперативный мониторинг их состояния;
- оперативное картографирование и изучение температурного режима морей и океанов;
- оперативное картографирование и изучение ареалов распространения взвешенного вещества;
- анализ распространения и динамики размещения фитопланктона в целях определения биопродуктивности моря и цветения вод;
- отслеживание ледовой и снеговой обстановки на суше и на море;
- мониторинг уровня, стока и дельт крупных рек;

- изучение облачного покрова, мониторинг опасных атмосферных явлений, скорости ветра и высоты волн;
- мониторинг природных и антропогенно-спровоцированных катастроф на региональном уровне, лесных пожаров, наводнений;
- создание и обновление топографических и специальных карт и планов вплоть до масштаба 1:2000;
- широкий круг задач в области изучения глобального и регионального изменения климата.

Многие годы эти задачи успешно решаются учеными ведущих институтов Российской академии наук, проводящих исследования морей и океанов методами дистанционного зондирования из космоса. Ими активно разрабатываются методы и технологии, позволяющие использовать результаты космической деятельности для решения широкого круга научных, экологических, природопользовательских и природоохранных задач. Результаты работ соответствуют мировому уровню. Многие из них получены при выполнении международных проектов, неоднократно обсуждались на конференциях и симпозиумах, а руководители работ стали признанными за рубежом специалистами в области дистанционного зондирования океана из космоса.

Практические результаты в области мониторинга экологического состояния морей России, динамики вод, уровня и температурного режима морей в настоящий момент востребованы крупнейшими частными и государственными организациями. Некоторые из этих примеров приведены в следующих главах книги.

При проведении спутникового мониторинга морей России, особенно оперативного мониторинга, авторами учитывался положительный и негативный опыт его проведения за рубежом. На рис. 1.1 (см. с. 22) представлена общая принципиальная схема спутникового мониторинга кризисных ситуаций, которая может быть применена к любому району Мирового океана. Она включает в себя спутники, наземные приемные станции, центры обработки спутниковой информации, океанологические институты и метеорологические центры. Вместе с информацией с самолетов и судов, спутниковая, океанографическая и метеорологическая информация поступает в Центр мониторинга, где происходит комплексный анализ всей информации, идентификация загрязнений, делается прогноз на развитие ситуации. Эти данные поступают в Кризисный центр, который управляет ситуацией, и на борт судов, находящихся в море на месте проведения работ. Следует, однако, учитывать, что это схема «идеальная» и, как показывает практика, плохо работает в случае именно кризисных ситуаций, когда требуется максимальная оперативность в действиях всех служб. Для рутинного ежедневного мониторинга акваторий (вне зависимости от наличия загрязнений) она тоже не годится, поскольку слишком дорогостояща.

Так, во время ликвидации последствий аварии на танкере «Престиж» адмирал ВМС Франции Жак Геербрант, морской префект Атлантики, руководивший всей операцией, был недоволен тем, что проанализированные спутниковые изображения нефтяного загрязнения кризисный центр получал через 48 ч после пролета спутников (Le Monde, 13 ноября 2003 г.). Та же ситуация повторилась в июле 2006 г. у берегов Ливана, когда в результате налета израильской авиации были разрушены нефтехранилища в районе Бейрута и в Средиземное море попало 15 тыс. т нефти (Kostianoy, 2008). О масштабах загрязнения не было известно несколько суток, причем отсутствие



Рис. 1.1. Общая схема спутникового мониторинга кризисных ситуаций

информации вызвало озабоченность даже правительства Кипра. Ситуация вновь повторилась в Мексиканском заливе, когда 20 апреля 2010 г. произошла авария на нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon компании British Petroleum (BP) (Лаврова, Костяной, 2010). Спутниковые оптические изображения района аварии были получены практически сразу, а полноценную радиолокационную съемку, которая и позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения, удалось организовать только 25 апреля. Во всех этих случаях, из-за отсутствия постоянного комплексного спутникового мониторинга, было потеряно значительное время (несколько суток) для организации работ по ликвидации аварий и катастрофических разливов нефти.

Это происходило по нескольким причинам: рутинный ежедневный мониторинг района аварии не велся, и его пришлось организовывать с нуля, в том числе и делать экстренный заказ на радиолокационную съемку района аварии; очень часто местные власти (в данном случае Испания и Ливан) не обладают всеми составными частями, указанными в схеме мониторинга (см. рис. 1.1), поэтому для его организации пришлось обращаться за помощью к другим странам и Европейскому космическому агентству; национальные и международные организации, привлеченные к мониторингу, начали работать в районе аварии (сбор оперативной океанографической и метеорологической информации, численное моделирование) также практически с нуля; в результате, на организацию и согласование работ между составными частями мониторинга ушло слишком много времени, даже при том, что произошли ката-

строфы европейского и американского масштаба, в ликвидации которых были задействованы десятки национальных и международных организаций.

Забегая вперед, отметим, что, по нашему опыту оперативного мониторинга нефтяного загрязнения юго-восточной части Балтийского моря (см. гл. 3), аварий такого масштаба не возникало, но в ряде кризисных ситуаций, связанных с обнаружением нефтяных пятен вблизи платформы или российских берегов, первичная информация о загрязнении поступала в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» уже через 4 часа после пролета спутника. Такая оперативность была достигнута благодаря: упрощенной схеме мониторинга (рис. 1.2, см. с. 24), в которой специалисты в области разных спутниковых методов наблюдений, обработки данных, радиолокации, океанографии, метеорологии, динамики вод, численного моделирования были собраны в одном Центре мониторинга; спутниковой радиолокационной съемке, которая велась постоянно во всех пролетах спутника Envisat над акваторией Балтийского моря, вне зависимости от аварий или наличия загрязнений; ежедневному комплексному мониторингу, который включал сбор не только разнообразной спутниковой информации о состоянии моря, но и метеорологических и океанографических данных; круглосуточному оперативному доступу к численной модели дрейфа нефтяных пятен Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии.

На рис. 1.2 представлена схема спутникового мониторинга, использованная авторами при мониторинге нефтяной платформы Д-6. Ее же с небольшими модификациями предлагалось использовать и для организации оперативного комплексного экологического мониторинга строительства газопровода «Норд Стрим». Принципиальное отличие заключается в необходимости организации двухсторонней оперативной связи с руководством работ на борту судна (красные стрелки). Это значительно повысило бы оперативность и эффективность спутникового мониторинга. В представленной схеме не указана возможность оперативного оповещения иностранных государств или международных организаций о наблюдаемом загрязнении, поскольку этот вопрос является прерогативой заказчика работ и принятие решения о передаче информации в том или ином объеме лежит на нем.

Как показывает опыт, спутниковый мониторинг должен базироваться на надежной, быстрой и оперативной связи между всеми соисполнителями. Это подразумевает наличие: высокоскоростного Интернета у всех соисполнителей; собственного Интернет-сервера для перекачки больших объемов данных; отлаженной системы взаимодействия и оповещения, включающей телефон, мобильную связь и электронную почту; ежедневного почасового графика выполняемых работ.

Необходимо предусмотреть дублирование всех систем мониторинга: работы операторов; анализа данных; связи — мобильный, городской и домашний телефоны, наличие адресов электронной почты у разных провайдеров; запасной Интернет-сервер для обмена данными; наличие различных видов доступа в Интернет (по выделенной линии, по телефонной линии через модем, мобильную связь).

На борту судна (платформы) необходимо организовать ежедневную запись информации о гидрометеорологических условиях и обо всех судах, проходящих на расстоянии действия судового радара (время, скорость, тип и название судна, его маршрут и т.д.). С той же целью необходимо иметь доступ к Системе автоматической идентификации судов (AIS) и вести записи о нахождении судов в зоне спутникового мониторинга.

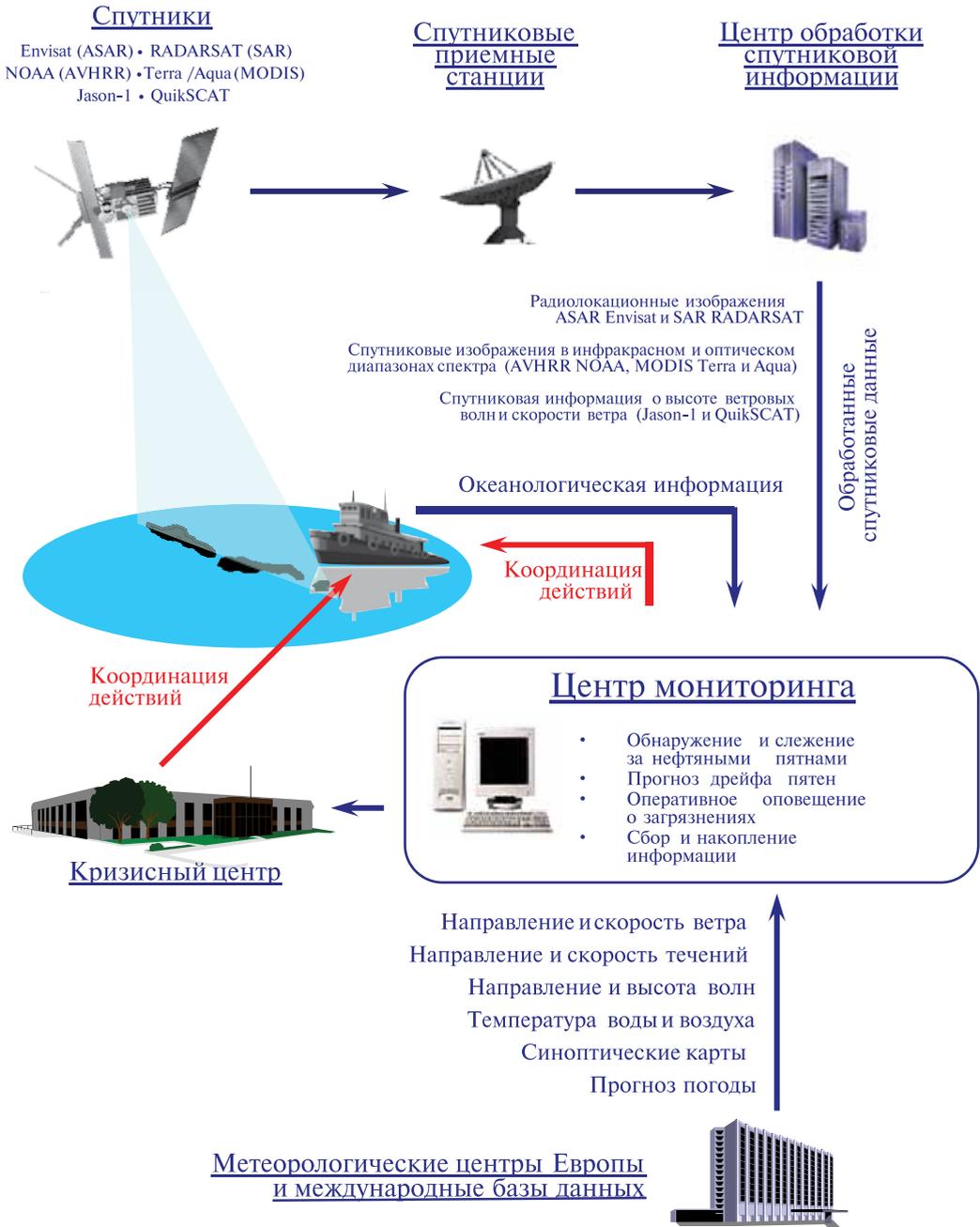


Рис. 1.2. Схема спутникового мониторинга, которая была использована при мониторинге нефтяного загрязнения в районе платформы Д-6 в юго-восточной части Балтийского моря в 2004–2005 гг. и предложена для мониторинга строительства газопровода «Норд Стрим» в 2010–2012 гг.

Более детально требования к составу, структуре и параметрам функционирования комплексной системы мониторинга (в том числе спутникового) районов разработки и транспортировки углеводородных ресурсов на шельфе морей России представлены в одном из отчетов Министерству экономического развития Российской Федерации в рамках ФЦП «Мировой океан» (*Костяной и др., 2010б*).

Таким образом, спутниковая информация имеет важное практическое значение для рационального и экологически чистого природопользования при реализации проектов нефтегазовой отрасли в прибрежно-шельфовых зонах морей России, для мониторинга экологического состояния и прогноза эволюции экосистемы морей, рыболовства, оценки регионального изменения климата, информационного обеспечения экологической безопасности хозяйственной деятельности в морях России.

Глава 2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. СПУТНИКОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время радиолокационное (РЛ) зондирование в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне является одним из основных методов дистанционного исследования как океанических процессов, так и процессов взаимодействия океана и атмосферы. С точки зрения получения океанологической информации о мгновенном состоянии океана, радиолокационная съемка океана из космоса предоставляет следующие преимущества:

- возможность круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;
- возможность всепогодной съёмки, так как атмосфера практически прозрачна для используемого в радиолокации микроволнового излучения;
- диэлектрические свойства воды в микроволновом диапазоне однородны, что позволяет считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений и тем самым облегчает интерпретацию снимков.

Можно сказать, что уникальным свойством радиолокационной съемки по сравнению с оптической является возможность получать изображение с высоким пространственным разрешением (вплоть до нескольких метров) в широкой полосе обзора независимо от естественной освещенности (времени суток и года) и облачного покрова.

2.1.1. Основные сведения о радиолокаторах, используемых для аэрокосмического наблюдения океана

Активное дистанционное зондирование земной поверхности основано на измерении вариаций рассеянного излучения. При использовании в дистанционном зондировании океана радиолокационной станции (РЛС) — это может быть радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования или установленная

на самолете радиолокационная станция бокового обзора (РЛСБО) — информация о параметрах подстилающей поверхности содержится в функции отражения, которая наблюдается в виде отраженной от взволнованной морской поверхности электромагнитной волны в зоне приемной антенны. Функция отражения определяется не только свойствами самой поверхности, но и условиями ее формирования, т. е. системой испускаемых и принимаемых сигналов. РЛ-образ морской поверхности зависит от диапазона зондирования, поляризации излучения и угла падения зондирующего сигнала.

Излучающее устройство радиолокатора испускает электромагнитную волну. Ее характеристиками являются: длина λ ; частота — величина $f = C/\lambda$, где C — скорость распространения электромагнитных волн в среде (в вакууме $3 \cdot 10^8$ м/с); волновой вектор, указывающий направление распространения волны, а также поляризация электромагнитной волны. Последнее свойство очень важно, поскольку от ориентации плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны.

Для изучения океана используются радиолокаторы с длинами волн от 1,11 см (частота $f = 27$ ГГц) до 30 см (частота $f = 1$ ГГц). Обычно подобные радиолокаторы работают в импульсном режиме, хотя иногда применяется и непрерывное излучение. В табл. 2.1 приведены традиционные обозначения частотных диапазонов. Эти обозначения сложились на Западе в ходе Второй мировой войны. В настоящее время они закреплены в США стандартом IEEE, а также международным стандартом ITU.

Таблица 2.1. Частотные диапазоны РЛС

Диапазон	Частоты	Длина волны	Применение
P	< 300 МГц	> 1 м	Использовался в США на первых самолетах-лабораториях NASA
L	1–2 ГГц	15–30 см	РСА на борту ИСЗ SEASAT (США) и JERS-1 (Япония), сенсор SIR-C/X-SAR на борту космического челнока Endeavor (США)
S	2–4 ГГц	7,50–15 см	РСА ИСЗ «Алмаз-1»
C	4–8 ГГц	3,75–7,5 см	РСА на борту европейских спутников ERS 1/2 и Envisat и канадских спутников RADARSAT 1/2
X	8–12 ГГц	2,50–3,75 см	РСА на борту спутника TerraSAR-X (Германия)
Ku	12–18 ГГц	1,67–2,50 см	Ледовая разведка, картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия. РЛСБО «Нить» и «Торос» на борту самолетов-лабораторий Ту-134СХ и Ан-24

В практике радиолокационного зондирования Земли используются зондирующие сигналы с различной поляризацией (горизонтальной или вертикальной). Плоскость, проходящая через направление распространения электромагнитной волны и направление вектора электрического поля, называется плоскостью поляризации. Если плоскость поляризации в данной точке пространства сохраняет фиксированное положение, то волну называют плоско или линейно поляризованной. Поляризация излучения определяется ориентацией вектора электрического поля \mathbf{E} в плоскости,

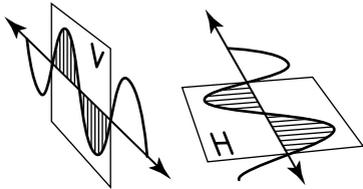


Рис. 2.1. Вектор электрического поля при вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях зондирующего сигнала

перпендикулярной направлению распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор электрического поля E_H параллелен подстилающей поверхности. При вертикальной поляризации вектор излучения E_V направлен под углом падения к местной вертикали (рис. 2.1).

В зависимости от конструктивных особенностей и режима работы РЛС приемопередающие системы могут осуществлять излучение и прием:

- на вертикальной (VV) поляризации;
- горизонтальной (HH) поляризации;
- перекрестных поляризациях (VH и HV).

Мощность обратно-рассеянного сигнала, попадающего в приемную антенну РЛС, зависит от поляризации излучения и от взаимного направления поляризаций при излучении и приеме. В общем случае коэффициент рассеяния водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестных поляризациях.

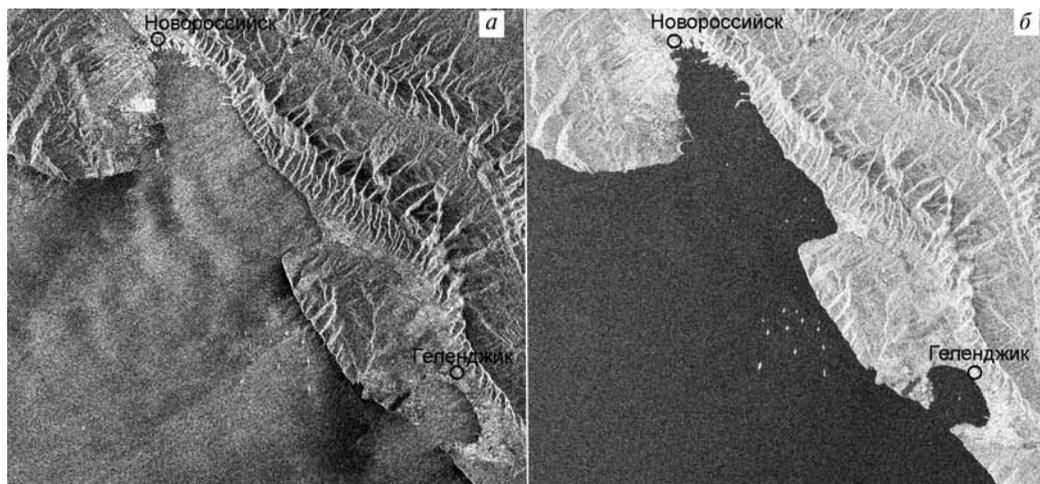
Вертикальная поляризация применяется для изучения широкого класса процессов и явлений, которые проявляются на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения.

Горизонтальная поляризация, будучи менее чувствительной к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, широко применяется для наблюдения морских льдов и разделения РЛ-образов ледяного покрова и открытой воды.

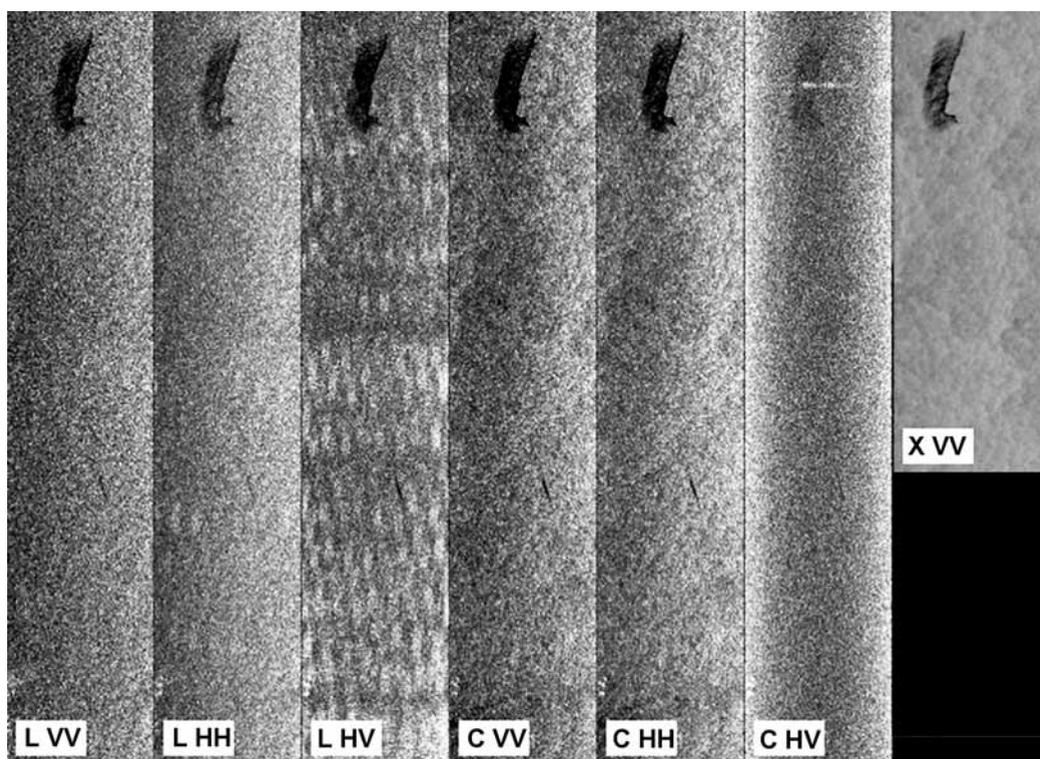
Поскольку интенсивность рассеяния морской поверхностью существенно понижается при использовании излучения и приема на перекрестных поляризациях (VH и HV), такие режимы используются для выделения на морской поверхности объектов, обуславливающих многократное рассеяние, таких, например, как корабли и деформации ледяного покрова (торосы, трещины, расколотый лед).

Влияние выбора поляризации иллюстрируется рис. 2.2 (см. с. 29), где представлены изображения, полученные одновременно, но при разных поляризациях отраженного сигнала. Радиолокационное изображение (РЛИ), приведенное на рис. 2.2а, получено при VV-поляризации. На нем отчетливо выделяются поверхностные проявления атмосферных явлений, в частности, внутренних волн в атмосфере. Суда на их фоне выделить довольно сложно, особенно при автоматическом детектировании. РЛИ, представленное на рис. 2.2б, получено на перекрестной VH-поляризации; на нем полностью отсутствуют поверхностные проявления океанических и атмосферных процессов, зато отчетливо выделяются радиолокационные образы судов (Лаврова и др., 2006).

Спутниковые радиолокаторы первого поколения обладали возможностью съемки на одной фиксированной поляризации зондирующего сигнала, либо горизонтальной (HH) — PCA спутников «Алмаз-1», RADARSAT-1, Seasat, JERS-1, либо вертикальной (VV) — PCA спутников ERS 1/2.



Р и с . 2.2. Фрагмент изображения Envisat ASAR от 27.08.2005, 19:13 UTC:
a — VV-поляризация; *б* — VH-поляризация



Р и с . 2.3. РЛИ, полученное 04.10.1994, 20:25 UTC сенсором SIR-C/X-SAR

Спутниковые радиолокаторы нового поколения, установленные на спутниках Envisat, RADARSAT-2 и TerraSAR-X, обладают возможностью проводить съемку в различных режимах: VV, HH, VV/HH, VV/VH, HH/HV.

Высокоинформативным инструментом исследования земной поверхности и океана при помощи радиолокационного зондирования из космоса стал радиолокатор с синтезированной апертурой SIR-C/X-SAR, установленный на космическом челноке Endeavor. Антенна этой радиолокационной станции состояла из трех модулей, один из которых работал в L-диапазоне (длина волны 23,5 см), второй — в С-диапазоне (длина волны 5,8 см), а третий — в X-диапазоне (длина волны 3 см). При этом изображения L- и С-диапазонов регистрировались одновременно для вертикальной, горизонтальной и перекрестной поляризаций зондирующего сигнала. В качестве примера на рис. 2.3 (см. с. 29) приведено РЛИ, полученное сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах и при различных поляризациях зондирующего сигнала. Ширина каждого фрагмента — 21 км. В полосе обзора на морской поверхности находятся нефтяное загрязнение, деформированное под воздействием ветра, и свежий сброс с движущегося судна.

2.1.2. Геометрия радиолокационной съемки

Радиолокаторы бокового обзора. На самолетах обычно устанавливают радиолокационные станции бокового обзора. Антенна такой станции вытягивается вдоль фюзеляжа самолета и обеспечивает боковое «видение». Совместим ось x с направлением движения самолета, а ось y направим перпендикулярно оси x (рис. 2.4).

Разрешение РЛСБО в боковом направлении (по наклонной дальности) определяется длительностью импульса τ : $\Delta y = \frac{c\tau}{2\sin\theta}$, где c — скорость света; θ — угол зондирования. При типичной длине импульса $\tau = 0,1$ мкс и высоких углах зондирования разрешение по наклонной дальности составит примерно 15 м.

Разрешение же в продольном направлении, т. е. в направлении полета (ось x), зависит от угловой (азимутальной) ширины диаграммы направленности $\Delta\phi$, которая

может быть оценена как отношение длины волны λ к длине антенны L_a : $\Delta\phi \approx \lambda/L_a$. Тогда разрешение в азимутальном направлении

определяется как: $\Delta x = \frac{H\Delta\phi}{\cos\theta}$, где H — высота полета.

В частности, при длине волны $\lambda = 2$ см и длине антенны $L_a = 6$ м (для самолетной антенны это довольно большой размер)

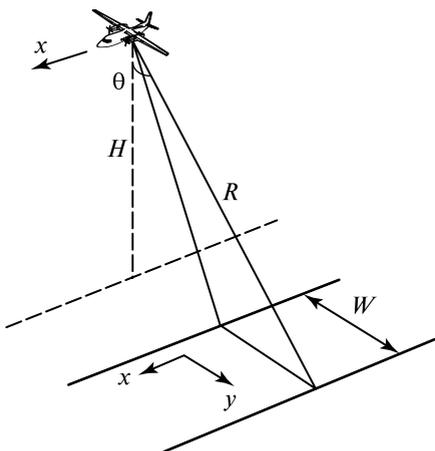


Рис. 2.4. Геометрия радиолокационной съемки подстилающей поверхности при помощи РЛСБО, установленной на самолете-лаборатории: H — высота полета; W — ширина полосы обзора; R — наклонная дальность; θ — угол падения, отсчитываемый от вертикали

и номинальной высоте полета 2 км имеем $\Delta\varphi \approx 1/300$ рад, элемент разрешения Δx на расстоянии $y = 10$ км от оси полета составит $\Delta x = y\Delta\varphi/2 = 15$ м. Таким образом, в рассмотренном примере элемент разрешения (пиксел) на плоскости x, y имеет размер 15×15 м.

При установке РЛСБО на спутнике размеры элемента разрешения в продольном направлении (ось x) заметно возрастают по причине увеличения наклонной дальности R , которая составляет, в зависимости от высоты орбиты, 400–1000 км. Так, РЛСБО, установленная на спутнике «Океан-О», имела разрешение 1300×2000 м.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой. Разрешение Δx в продольном направлении можно улучшить, если использовать технику «синтезирования апертуры». Этот метод предусматривает специальную когерентную (т.е. с сохранением фазы) обработку рассеянных сигналов в течение некоторого времени Δt , за которое самолет или спутник, движущийся со скоростью v , пролетает расстояние $v\Delta t$. Расстояние $\Delta L_{\text{синт}} = v\Delta t$ играет роль длины *синтезированной* антенны и может в сотни и тысячи раз превышать физические размеры бортовой антенны L_a .

При $\Delta L_{\text{синт}} = 5$ км, длине волны 5 см и наклонной дальности $R = 1000$ км разрешение Δx , оцененное с помощью приведенной выше формулы, составит 5 м. Весьма высокое разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой сочетается со способностью работать в условиях облачности и в темное время суток. В этом их главное преимущество перед приборами видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов.

Краткие сведения о спутниковых РСА как первого поколения, так и функционирующих на орбите в настоящее время, даны в табл. 2.2 (см. с. 32). Более полная информация о спутниковых радиолокаторах приведена в работах (*Верба* и др., 2010; *Jackson, Apel*, 2002a).

2.1.3. Радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR космического аппарата Envisat

В настоящее время РСА установлены на европейских спутниках ERS-2 и Envisat, на канадских RADARSAT 1/2, а также на немецких TerraSAR-X и TanDEM-X. Данные спутников RADARSAT 1/2, TerraSAR-X и TanDEM-X распространяются исключительно на коммерческой основе. Наиболее доступны и пригодны для целей регулярного мониторинга различных акваторий на сегодняшний день данные радиолокаторов, установленных на европейских спутниках Envisat и ERS-2. Однако космический аппарат ERS-2 находится на орбите с 1995 г., практически полностью исчерпал свой ресурс и в ближайшее время может быть отключен.

Улучшенный **радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR** (Advanced Synthetic Aperture Radar), установленный на спутнике Envisat, использует фазированную антенную решетку с углом падения лучей от 15 до 45°. Съемка выполняется в С-диапазоне длин волн (5,6 см) в пяти различных режимах поляризации (VV, HH, VV/HH, HV/HH, VH/VV). Полученные этим сенсором радиолокационные данные находят применение для мониторинга нефтяных пятен и льда на поверхности моря, определения местоположения судов, исследования различных океанских явлений

Таблица 2.2. Краткие сведения о спутниковых радиолокаторах с синтезированной апертурой

	ИСЗ							
	SEASAT	ERS 1/2	«Алмаз»	JERS-1	RADARSAT-1	Envisat	RADARSAT-2	Terra-SAR-X
Страна	США	ЕС	СССР	Япония	Канада	Европа	Канада	Германия
Год вывода на орбиту	1978	1991/1995	1991	1992	1995	2002	2007	2008
Диапазон	L	C	S	L	C	C	C	X
Частота зондирующего сигнала, ГГц	1,275	5,25	3,1	1,275	5,3	5,7	5,3	9,65
Длина волны зондирующего сигнала (см)	23,5	5,66	9,6	23,5	5,66	5,66	5,66	3,13
Поляризация	HH	VV	HH	HH	HH	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV	HH, VV, VH, HV
Угол падения, град	20	23	17–62	39	20–50	15–45	20–60	20–55
Ширина полосы обзора по наземной дальности, км	100	100	30–60	75	50–500	56–400	18–500	10/30/100
Пространственное разрешение, м	25	25	25	18	8–100	25–150	3–100	1/3/16

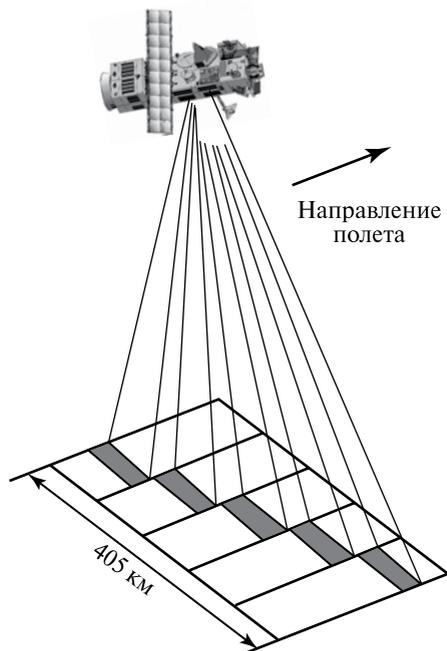
(течений, фронтов, вихрей, внутренних волн), процессов в атмосфере над океаном (внутренние гравитационные волны, конвекция, атмосферные фронты и вихри) и других целей. Конструкция радиолокатора предусматривает возможность проведения съемок в различной по ширине полосе обзора и с различным пространственным разрешением, позволяя пользователю выбрать режим работы, соответствующий характеру решаемых задач. Характеристики основных режимов работы сенсора ASAR ИСЗ Envisat приведены в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3. Характеристики режимов работы сенсора ASAR ИСЗ Envisat

Режим	Ширина полосы обзора, км	Разрешение, м	Поляризация
Стандартный (Image Mode)	от 56 до 100	30	VV, HH
Поляризационный (Alternating Polarisation Mode)	от 56 до 100	30	HH/VV, HH/HV, VV/VH
Широкополосный (Wide Swath Mode)	400	150	VV, HH
Глобального мониторинга (Global Monitoring Mode)	400	1000	VV, HH
Спектральный (Wave Mode)	5	30	VV, HH

Съемка в широкой полосе обзора Wide Swath Mode (WSM) предоставляет возможность проведения съемки в полосе обзора 400 км с пространственным разрешением 150×150 м на одной из выбранных поляризаций зондирующего сигнала (VV или HH) и позволяет получать радиолокационные изображения одного и того же района подстилающей поверхности с периодом повторных наблюдений от 1 дня в полярных регионах до 1 недели на экваторе. Геометрия радиолокационной съемки в режиме широкой полосы обзора представлена на рис. 2.5.

Режим двухполяризационной съемки (Alternating Polarisation Mode) позволяет получать одновременные пары изображений подстилающей поверхности, сформированные при различных сочетаниях поляризаций излученного и принятого радиолокационных сигналов, а именно VV/HH, HH/HV и VV/VH в полосе обзора 100 км и с пространственным разрешением до 30 м. Геометрия радиолокационной съемки в режиме двух поляризаций показана на рис. 2.6 (см. с. 34).



Р и с . 2.5. Получение изображения в широкой полосе обзора

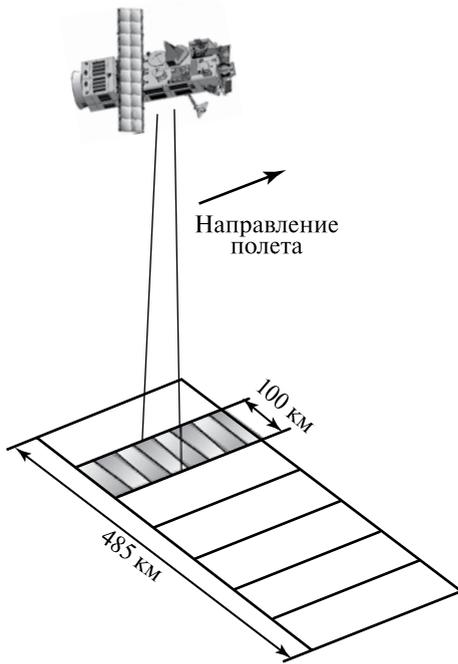


Рис. 2.6. Получение изображения при двух поляризациях зондирующего сигнала

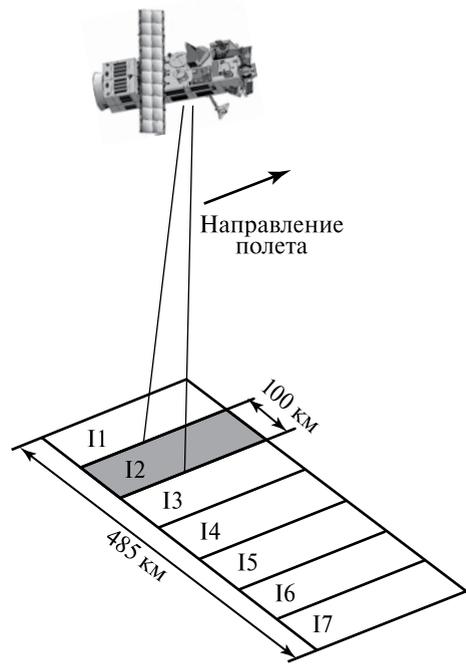


Рис. 2.7. Получение изображений с высоким пространственным разрешением в узкой полосе обзора

Таблица 2.4. Геометрические характеристики изображений с высоким разрешением

Номер полосы	Ширина полосы, км	Расстояние от воображаемой наземной линии орбиты, км	Диапазон углов наблюдения, град
I1	105	187–292	15,0–22,9
I2	105	242–347	19,2–26,7
I3	82	337–419	26,0–31,4
I4	88	412–500	31,0–36,3
I5	64	490–555	35,8–39,4
I6	70	550–620	39,1–42,8
I7	56	615–671	42,5–45,2

При проведении **съемки в узкой полосе обзора (Image Mode)** фазированная антенная решетка путем изменения угла излучения зондирующего сигнала позволяет выбрать любую из 7 полос и получать изображение с высоким пространственным разрешением (30×30 м) на одной из выбранных поляризаций (VV) или (HH) размером от 56 км (7-я полоса) до 100 км (1-я полоса). Геометрия радиолокационной съемки в режиме узкой полосы обзора представлена на рис. 2.7, а основные геометрические характеристики съемки для различных полос сведены в табл. 2.4.

2.1.4. Основные механизмы формирования радиолокационных изображений морской поверхности

Электромагнитные волны СВЧ-диапазона проникают в воду не более чем на несколько миллиметров, но протекающие в океане процессы визуализируются благодаря своим поверхностным проявлениям. Поэтому радиолокационные изображения поверхности океана, полученные с космических и авиационных носителей, несут информацию о явлениях, происходящих не только в приповерхностном слое, но и в глубине океана.

Отраженный от поверхности океана РЛ-сигнал обусловлен рассеянием брегговского типа на ряби — коротких гравитационно-капиллярных волнах на морской поверхности, возбуждаемых приповерхностным ветром. Атмосферные и внутриокеанические процессы тем или иным способом модулируют эти гравитационно-капиллярные волны, что проявляется в модуляциях интенсивности радиолокационного сигнала. Различные структуры на поверхности океана становятся видимыми благодаря тем или иным механизмам модуляции ряби, главным образом — течениям и поверхностно-активным веществам (ПАВ), влияющим на поверхностное натяжение жидкости. Таким образом, радиолокационные изображения поверхности океана могут визуализировать движения как в самом океане, так и в атмосфере над ним. Это своего рода природная камера Вильсона, делающая возможным наблюдение эффектов, скрытых от глаза. Огромное преимущество волн СВЧ-диапазона перед электромагнитными волнами других диапазонов состоит в том, что они проникают через облачный покров, обеспечивая круглосуточное и всепогодное наблюдение океана. Еще одно преимущество СВЧ-радиоволн, важное для задач дистанционной диагностики океана, заключается в том, что эти волны резонансным образом взаимодействуют с коротковолновой компонентой поверхностного волнения и тем самым визуализируют такие движения в океане, которые недоступны для наблюдения в других диапазонах электромагнитного спектра.

Эффективность применения космических средств дистанционного зондирования в большой мере зависит от наличия адекватных моделей, связывающих характеристики принимаемого спутниковым прибором микроволнового излучения с параметрами морской поверхности и атмосферы над ней.

Резонансный (брегговский) механизм рассеяния. В диапазоне СВЧ вода представляет собой проводящую жидкость с диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'',$$

вещественная и мнимая части которой зависят от частоты. По своей величине значения ϵ' и ϵ'' сопоставимы друг с другом — скажем, на длине волны $\lambda = 3$ см $\epsilon = 49,3 + i39,5$ (Шутко, 1986). Достаточно высокие значения ϵ' и $i\epsilon''$ позволяют в первом приближении считать воду идеальным проводником.

Величины ϵ' и ϵ'' весьма слабо зависят от температуры и солёности воды, так что сечение радиолокационного рассеяния зависит, прежде всего, от формы поверхности и лишь в малой степени — от других факторов.

При зондировании под умеренными углами (18–50°) и в отсутствии длинных поверхностных волн основной вклад в формирование обратного рассеяния вносит брегговское резонансное рассеяние. Общепринятая резонансная теория рассеяния

радиоволн основана на использовании метода малых возмущений. В рамках метода возмущений высота неровностей поверхности $z = \zeta(\rho)$ считается малой по сравнению с длиной электромагнитной волны λ : $|z| \ll \lambda$, так что в уравнениях Максвелла возникает малый параметр $\mu = k\sigma_\zeta \ll 1$ (здесь $\rho = (x, y)$ — двумерный вектор в плоскости x, y ; $\sigma_\zeta = \langle \zeta^2 \rangle^{1/2}$ — среднеквадратичное возмущение поверхности). Волновое поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{пад}} + \mathbf{E}_{\text{отр}}$, представляющее собой сумму падающей ($\mathbf{E}_{\text{пад}}$) и рассеянной ($\mathbf{E}_{\text{отр}}$) волн, можно разложить в ряд по параметру μ с использованием условия перпендикулярности суммарного поля \mathbf{E} границе хорошо проводящей жидкости. Интенсивность ведущего члена ряда (приближение однократного рассеяния) удобно характеризовать удельным сечением рассеяния σ , которое является безразмерной величиной (сечение рассеяния, измеряемое в квадратных метрах, отнесено здесь к единице площади).

Упрощенное выражение для удельного сечения рассеяния на горизонтальной поляризации (Басс, Фукс, 1972; Рытов и др., 1978) имеет вид:

$$\sigma_h^{\text{res}} = 4k^4 (\cos\theta)^4 F_\zeta(\mathbf{q}), \quad (2.1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор зондирующей волны; θ — угол падения, отсчитываемый от вертикали. Величина $F_\zeta(\mathbf{q})$, представляющая собой спектральную плотность неровностей, связана преобразованием Фурье

$$F_\zeta(\mathbf{q}) = \frac{1}{4\pi^2} \int K_\zeta(\rho) e^{i\mathbf{q}\rho} d\rho \quad (2.2)$$

с корреляционной функцией неровностей

$$K_\zeta(\rho) = \langle \zeta(\rho' + \rho)\zeta(\rho') \rangle. \quad (2.3)$$

Через \mathbf{q} здесь обозначена горизонтальная (в плоскости x, y) компонента вектора рассеяния $\mathbf{k}_{\text{рас}} - \mathbf{k}_{\text{исп}}$, равного разности между волновым вектором рассеянной волны $\mathbf{k}_{\text{рас}}$ и волновым вектором первичной волны $\mathbf{k}_{\text{исп}}$. При рассеянии строго назад, когда $\mathbf{k}_{\text{рас}} = -\mathbf{k}_{\text{исп}}$, имеем $\mathbf{q} = 2\mathbf{k}_{\text{исп}\perp}$ ($\mathbf{k}_{\text{исп}\perp}$ — горизонтальная компонента вектора $\mathbf{k}_{\text{исп}}$), откуда для модуля q получаем

$$q = 2k \sin\theta. \quad (2.4)$$

Величине q соответствует пространственная гармоника поверхностного возмущения $\Lambda = 2\pi/q$. В силу (2.4) эта гармоника связана с длиной электромагнитной волны $\lambda = 2\pi/k$ соотношением

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta}, \quad (2.5)$$

известным как соотношение Вульфа — Брегга.

Это соотношение определяет резонансную длину волны возмущения, которая селективно преобразует первичную волну, падающую под углом θ , в рассеянную волну, идущую в обратном направлении (Кравцов и др., 2000).

Для характерных углов зондирования $20-26^\circ$ длина резонансной компоненты поверхностного волнения наиболее распространенных частотных диапазонов такова:

- $3,9 \pm 0,5$ см — X-диапазон (длина зондирующей волны 23 см);
- 7 ± 1 см — C-диапазон (длина зондирующей волны 5,7 см);
- 30 ± 4 см — L-диапазон (длина зондирующей волны 23 см).

Следует отметить, что, согласно (2.5), с увеличением угла зондирования возрастает и длина резонансной компоненты поверхностного волнения.

Схематично механизм формирования брегговского резонансного рассеяния изображен на рис. 2.8.

Двухмасштабная модель рассеяния. Спектр морского волнения принято делить на две компоненты — крупномасштабную и мелкомасштабную. К крупномасштабной относят волны, длина которых превышает 1 м. Гравитационно-капиллярные волны сантиметрового и отчасти дециметрового масштаба, так называемую «рябь», относят к мелкомасштабной компоненте. Двухмасштабную или композитную модель морской поверхности квалифицируют также как «рябь на крупной волне» (рис. 2.9).

Влияние ряби учитывают в рамках теории возмущений (брегговский механизм рассеяния), а влияние крупномасштабной компоненты — изменением наклона поверхности. В результате мелкомасштабная компонента волнения (ее «сантиметровая» часть) оказывается ответственной за обратное рассеяние радиолокационных сигналов, а крупномасштабная — за пространственную модуляцию рассеянных сигналов. Такой комбинированный подход известен как двухмасштабная модель рассеяния.

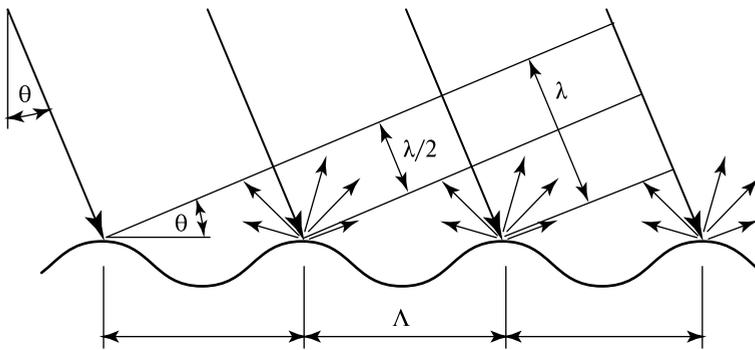


Рис. 2.8. Механизм формирования резонансного рассеяния радиолокационного сигнала на взволнованной морской поверхности: λ — длина зондирующей волны; Λ — длина резонансной компоненты спектра поверхностного волнения; θ — угол между направлением зондирования и надиром

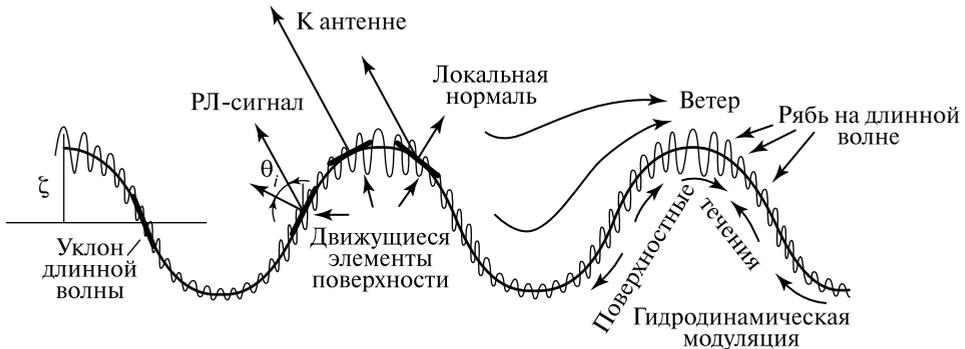


Рис. 2.9. Схематичное представление двухмасштабной модели поверхности

Длинноволновая компонента различным образом воздействует на рассеяние.

Во-первых, длинноволновая компонента меняет локальный угол падения, так что угол θ в формуле (2.4) будет промодулирован крупными волнами. Этот эффект получил название «модуляция уклонами длинных волн».

Во-вторых, спектр ряби испытывает на себе воздействие локальных течений, индуцированных крупной волной. Дело в том, что частицы жидкости, участвующие в волновом процессе, движутся по эллиптическим траекториям, что и создает течения на поверхности жидкости. Эти течения растягивают и модифицируют гравитационно-капиллярные волны, если токи жидкости и капиллярные волны движутся в одном и том же направлении, и сжимают волновые пакеты капиллярно-гравитационных волн при движении в противоположном направлении. Такие эффекты могут быть описаны при помощи уравнения сохранения волнового действия и к ним применимо обобщенное название «гидродинамическая модуляция». Более подробно эти вопросы рассматриваются в работах (*Басович, Таланов, 1977; Troitskaya, 1994; Горшков и др., 2003; Alpers, 1983*).

В-третьих, согласно (*Plant, 1997; Zavorotny, Voronovich, 1998*), вблизи вершины крупных волн образуется цуг ветро-независимых волн капиллярно-гравитационной части спектра. В работе (*Plant, 1997*) последние названы «связанными» брэгговскими волнами, чтобы отличить их от «свободных» брэгговских волн, под которыми подразумеваются капиллярно-гравитационные волны, возбужденные ветром. В результате действия указанных процессов крупная волна модулирует спектр ряби, что и создает предпосылки для «проявления» крупномасштабной компоненты поверхностного волнения на радиолокационных изображениях.

Рассмотренные механизмы модуляции дают наблюдаемый эффект, если длина крупных волн превышает элемент разрешения РЛС. При разрешении $\Delta x \approx 30$ м это условие реализуется только для достаточно длинных волн зыби, скажем, для поверхностных волн с длиной $\Lambda \geq 60-100$ м. Следует также отметить, что модуляция ряби может происходить посредством модуляции ветрового инкремента (*Троицкая, 2000*) и посредством модуляции декремента затухания, в частности, из-за присутствия пленок (*Ермаков, 2010*).

Двухмасштабная модель волнения и брэгговский резонансный механизм рассеяния неплохо описывают рассеяние для умеренных углов зондирования, что обычно имеет место при радиолокационном наблюдении морской поверхности со спутников. При больших углах, встречающихся при зондировании с самолетов, эта модель нуждается в совершенствовании за счет учета нерезонансных эффектов, в частности, рассеяния на микрообрушениях. Основные результаты в этом направлении освещены в публикациях (*Romeiser et al., 1994, Кравцов и др., 1999, Булатов и др. 2003а, Kudryavtsev et al., 2003, Voronovich, Zavorotny, 2001, Churyumov et al., 2003*).

Отметим, что РСА-изображения формируются несколько иначе, чем в случаях РЛСБО, судовых и береговых радаров, потому что к «обычной» модуляции брегговского сечения рассеяния в случае РСА добавляется еще один механизм, а именно, модуляция доплеровского смещения частоты. В РЛСБО такая модуляция не регистрируется, тогда как в случае РСА орбитальное движение позволяет «видеть» волнение даже в условиях, когда флуктуации сечения рассеяния отсутствуют.

Космические РСА работают при углах падения $20-60^\circ$. При таких углах эффекты нерезонансного рассеяния невелики, и формирование РСА изображений происходит

преимущественно на основе берегового механизма рассеяния, с участием эффекта Доплера. Доплеровская визуализация движения частиц жидкости, безусловно, является положительным для наблюдения эффектом. Однако такая визуализация сочетается и с негативным проявлением орбитального движения. Специфика отображения РСА морской поверхности связана с подвижностью последней, т. е. с тем, что за конечное время синтеза положение рассеивателей изменяется, или, что эквивалентно, наличие у рассеивателей радиальной скорости искажает доплеровский спектр сигнала. Это приводит к тому, что в РСА-изображении появляются интерференционные «биения» между доплеровскими частотами, которые на практике воспринимаются как характерные шумы, затрудняющие восстановление спектра волнения. В результате спектр волнения, регистрируемый когерентным РСА, работающим по случайному движению поверхности, оказывается не идентичным исходному спектру волнения. Особенности РСА-изображения морской поверхности проявляются в виде трех основных эффектов: ухудшение разрешающей способности по азимуту, расфокусировка изображения, дополнительная модуляция яркости изображения крупных поверхностных волн.

По вопросу формирования РСА-изображений морской поверхности имеется достаточно много публикаций как зарубежных, так и отечественных авторов (*Alpers et al.*, 1981; *Alpers, Rufenach*, 1979; *Kanevsky*, 1993; *Каневский*, 2004).

Радиолокационные данные активно используются при изучении различных процессов, происходящих в океане, а также явлений, воздействующих на его поверхность. Однородность диэлектрических свойств морской поверхности существенно облегчает анализ радиолокационных изображений и позволяет связать интенсивность обратно рассеянного сигнала с характеристиками шероховатости поверхности океана. Двумерные распределения радиолокационного сечения обратного рассеяния позволяют наблюдать пространственные характеристики изучаемых явлений.

2.1.5. Процессы и явления, проявляющиеся на радиолокационных изображениях морской поверхности

Прежде всего, на радиолокационных снимках видны поверхностные проявления *течений*, а также *гидрологических фронтов*, представляющих собой границы раздела морских вод с различными свойствами: температура, солёность, плотность, цвет, различные взвеси и органические примеси (*Romeiser et al.*, 2001; *Johannessen et al.*, 2005). В свою очередь, течения могут быть связаны с топографией дна (особенно на мелководье), так что радиолокационные снимки косвенно могут нести информацию и о *рельефе дна*.

На радиолокационных изображениях морской поверхности детектируются морские вихревые структуры различных размеров, с диаметрами от нескольких до десятков километров. Как правило, на радиолокационных изображениях эти вихри визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теплое время года. Эти пленки обладают способностью гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения, в силу неравномерного распределения сил упругости, зависящей от

концентрации в местах их скопления, и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра (*Alpers, Hühnerfuss, 1989; Митягина, Лаврова, 2009; Mityagina et al., 2010*). Благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры малых размеров, с характерными размерами в несколько километров. Вследствие небольших размеров эти вихри невозможно обнаружить с помощью спутниковых оптических и ИК-сенсоров. Кроме того, радиолокационное изображение позволяет выявить тонкую структуру вихря, что дает возможность оценить долю пленок биогенного происхождения, вовлеченных в вихревую структуру и сконцентрированных в зонах конвергенции.

Радиолокаторы высокого разрешения могут выявлять *поверхностное волнение*, точнее, крупномасштабную компоненту волнения с характерными длинами, превышающими 20–40 м.

Особый интерес представляют собой поверхностные проявления *внутренних волн* в океане. Существование внутренних волн в толще морских вод обусловлено устойчивой стратификацией, соответствующей увеличению плотности воды в направлении силы тяжести. Внутренние волны играют важную роль в процессах горизонтального и вертикального обмена и перемешивания вод и в формировании термохалинной циркуляции водоемов. Амплитуда внутренних волн может достигать в океане ста метров, длины волн — многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, при определенных условиях внутренние волны могут проявляться на поверхности океана, модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями (*Ермаков и др., 1980; Басович и др., 1982; Баханов, Таланов, 1999; Горшков и др., 2003*). Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн в океане — это чередование квазипараллельных полос выглаженной (слики) и шероховатой (сулои) морской поверхности.

Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на радиолокационных изображениях морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала, обусловленных модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра поверхностного волнения переменными течениями, создаваемыми в приповерхностном слое внутренними волнами (*Alpers, 1985; Кравцов и др., 1997a; Ermakov et al., 1998*).

На поверхности океана отражаются не только внутриокеанические, но и некоторые атмосферные процессы. В частности, на радиолокационных изображениях видны проявления вариаций *поля приповерхностного ветра*, который воздействует на сантиметровую составляющую спектра волн на морской поверхности (гравитационно-капиллярные волны) и тем самым влияет на рассеяние радиоволн. Флуктуации скорости ветра «отпечатываются» на морской поверхности и тем самым — на радиолокационных изображениях, в виде пятен сантиметровой ряби различной интенсивности. Первоначально этот «ветровой шум» рассматривался как мешающий фактор при наблюдении волнения, а также сликов, вызванных внутренними волнами, течениями, разливами нефти, осадками и т.п. Однако позднее выяснилось, что характеристики этих шумов несут информацию о пространственно-временной структуре ветра и, следовательно, могут использоваться для изучения процессов в приводном слое атмосферы.

Возбужденная ветром мелкомасштабная рябь на поверхности океана визуализирует ряд других атмосферных движений: *атмосферные фронты*, *атмосферные внутренние волны*, а также атмосферные *конвективные ячейки*, развивающиеся над океаном в условиях неустойчивой стратификации, т. е. когда температура морской поверхности превышает температуру атмосферы над ней. Возможность выявлять и исследовать внутренние гравитационные волны и конвективные процессы в приводном слое атмосферы методами радиолокации была продемонстрирована в работах (Кравцов и др. 1997б; Mityagina et al., 1998; Ufermann, Romeiser, 1999; Митягина и др., 2004; Mityagina, 2006). Наконец, радиолокаторы реагируют на *атмосферные осадки*, которые могут как усиливать, так и ослаблять (за счет эффекта «выглаживания» поверхности) рассеяние радиоволн.

Помимо этого, радиолокаторы в состоянии видеть выглаженные участки поверхности — слики, в том числе слики, обусловленные *нефтяными загрязнениями* и *поверхностно-активными веществами*.

2.1.6. Основные принципы обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности при помощи спутниковой радиолокации

Весьма интересной оказывается ситуация зондирования областей морской поверхности, покрытых поверхностными, в том числе нефтяными, пленками — так называемых пленочных сликов. Наличие поверхностной пленки приводит к понижению интенсивности волно-ветрового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения. В этом случае на поверхности океана образуются выглаженные области, которые проявляются на радиолокационном изображении как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности (Митягина, Чурюмов, 2006; Mityagina, Churimov, 2006; Булатов и др., 2003б).

Радиолокационные образы разливов углеводородов на морской поверхности, естественно, зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется рядом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти. Форма разлива оказывается разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта.

Поведение разлитой на морской поверхности нефти может быть весьма разнообразным. Сырая нефть начинает растекаться, образуя слик (область «выглаживания» на морской поверхности). В экспериментах с контролируруемыми разливами было обнаружено, что более 90 % нефти длительное время находится в относительно небольшой центральной области, площадь которой растет пропорционально $t^{1/5}$ (t — время с момента разлива нефти). Толщина пленки здесь составляет $2,4 \pm 0,3$ мм. Значительно большая площадь моря оказывается покрытой пленкой толщиной 2–4 мкм. В этой области загрязненная площадь увеличивается заметно быстрее — пропорционально $t^{3/5}$. В отличие от ПАВ, пленки которых способны растекаться до мономолекулярного слоя, нефть на поверхности воды создает пленки конечной толщины.

С точки зрения радиолокационного детектирования разливов нефти, к наиболее существенным процессам можно отнести испарение, эмульгирование и диспергирование (Brekke, Solberg, 2005). Смешиваясь с водой, нефть образует эмульсию двух

типов: прямую «нефть в воде» и обратную «вода в нефти». Прямые эмульсии, составленные капельками нефти диаметром до 0,5 мкм, менее устойчивы и характерны для нефти, содержащей ПАВ. Степень эмульсификации оценивается на основе показателя абсорбции воды как функции воздействия ветра для конкретного типа нефти.

При контакте с воздухом некоторые легкие фракции нефти испаряются, нефть образует вязкие обратные эмульсии, которые могут сохраняться на поверхности долгое время, переноситься течением, выбрасываться на берег и оседать на дно. Скорость испарения зависит от типа нефти, толщины пленки, скорости ветра и температуры воды.

Установлено (*Браво-Животновский* и др. 1984; *Ермаков* и др., 1987), что пленки в разливах нефтепродуктов характеризуются сильной неоднородностью по толщине и по степени гашения волн и, в среднем, оказывают меньшее гасящее действие, чем пленки ПАВ.

В ходе ряда радиолокационных экспериментов (*Булатов* и др., 2003б) была экспериментально исследована зависимость радиолокационных контрастов при наличии на морской поверхности нефтяной пленки от параметров волнения, скорости и направления ветра и состояния приводного слоя атмосферы. Определены условия, оптимальные для радиолокационных наблюдений загрязнений: скорость ветра — 3–9 м/с, волнение — до 4 баллов, устойчивая стратификация приводного слоя атмосферы.

Важнейшим фактором, определяющим возможность достоверного детектирования нефтяных загрязнений на морской поверхности на радиолокационных изображениях, является приповерхностный ветер (*Gade et al.*, 1996). При скорости ветра, превышающей 9–10 м/с, пленочные загрязнения любой природы — как нефтяные, так и биогенные — не различимы на радиолокационных изображениях морской поверхности.

В штилевых условиях или при слабых неустойчивых ветрах резонансная составляющая поверхностного волнения может не развиться, что приводит к ослаблению радиолокационных контрастов. На радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, присутствует большое количество областей ослабления рассеяния, не относящихся к пленочным загрязнениям, что повышает вероятность ложной тревоги при детектировании пятен нефтяных загрязнений по радиолокационным данным.

Задача распознавания нефтяных пятен на радиолокационных снимках существенно усложняется тем, что эти пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от других проявлений, которые принято называть «подобиями» пятен (*Espedal, Johannessen*, 2000).

Среди РЛ-подобий нефтяных пятен можно назвать органические пленки, некоторые типы льда («сало»), области, затененные сушей (ветровая тень), области локального ослабления приповерхностного ветра, гидрологические фронты, поверхностные проявления океанических внутренних гравитационных волн, дождевые ячейки, зоны апвеллинга. Все вышеперечисленные процессы и явления приводят к перестройке спектра поверхностного волнения, ослабляя резонансную рябь, и проявляются на радиолокационных изображениях в виде областей пониженного рассеяния, которые могут быть ошибочно интерпретированы как нефтяные загрязнения.

Главная трудность заключается в выявлении пятен загрязнений нефтепродуктами и пленок биогенных поверхностно активных веществ на морской поверхности. Органические пленки естественного происхождения повсеместно встречаются на

обширных площадях морской поверхности, преимущественно в теплое время года и в областях повышенной биологической активности, особенно в прибрежной зоне. Пленки естественного происхождения очень чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции. Благодаря этому их можно идентифицировать на радиолокационных изображениях.

Основные типы подобий нефтяных загрязнений, их природа, условия возникновения и особенности их проявлений на радиолокационных изображениях морской поверхности представлены в табл. 2.5. Множество примеров РЛ-изображений нефтяных загрязнений морской поверхности и их подобий приводится в гл. 3.

Таблица 2.5. Основные типы «подобий» нефтяных загрязнений морской поверхности и их радиолокационные проявления

Геофизическое явление	Форма проявления на радиолокационном изображении	Районы возникновения	Гидрометеорологические условия
Естественные биогенные пленки	Отражают структуру течений	Прибрежные зоны	Разрушаются при скорости ветра >7 м/с
Области локального ослабления ветра	Обширные зоны пониженного рассеяния	Повсеместно	Скорость ветра <2 м/с
Области ветровой тени	Ориентированные по направлению ветра области пониженного рассеяния вблизи побережья	Вблизи береговой черты при гористом рельефе побережья	Даже при сильном ветре вплоть до 15 м/с
Дождевые ячейки	Светлые ячеистые структуры с темным центром	Повсеместно	Интенсивные дожди и сильный ветер
Внутренние волны в океане	Узкие протяженные полосы квазипериодического усиления и ослабления рассеяния	Район свала глубин	Скорость ветра <8 м/с
Внутренние волны в атмосфере	Широкие полосы квазипериодического усиления и ослабления рассеяния	Повсеместно	Устойчивая стратификация приподнятого слоя атмосферы, сдвиговые течения в атмосфере
Молодой лед («сало»)	Обширные зоны пониженного рассеяния	Обычно вблизи береговой черты, на границе ледяного покрова	Холодное время года
Области цветения водорослей	Обширные компактные области пониженного рассеяния с четкими границами	Повсеместно	Теплое время года

В заключение отметим преимущества и ограничения метода спутниковой радиолокации для решения задачи выявления пленок углеводородов на морской поверхности. Неоспоримыми преимуществами являются: уникальный метод идентификации пятен нефтепродуктов (уникальность обусловлена тем, что из всех известных в настоящее время средств только РСА обладает абсолютной чувствительностью к шероховатости морской поверхности в сантиметровом диапазоне спектра волн, в наибольшей

степени подавляемый нефтяными плёнками); независимость от облачности и освещенности (день/ночь); большая площадь обзора — ширина полосы до 400 км; высокое пространственное разрешение 75 м/пиксел — 12,5 м/пиксел, что позволяет не только детектировать пленочные загрязнения на морской поверхности, обусловленные сбросом нефтепродуктов с судна, но и идентифицировать судно-виновник; повторяемость съемки — от 12 до 72 ч.

К числу ограничений метода следует отнести: возможность наблюдения только при определенных гидрометеорологических условиях, а именно — скорости ветра в диапазоне 3–9 м/с, волнения до 4 баллов, устойчивой стратификации приводного слоя атмосферы; интервал при съемке в режиме широкого захвата может достигать трех суток; в ряде случаев сигнатуры нефтяных пятен мало отличаются от зон пониженного радиолокационного сигнала, вызванных другими причинами, — естественными плёнками, локальным ослаблением ветра, внутренними волнами, апвеллингом.

2.1.7. Методы обработки радиолокационных изображений океана

Стандартная процедура обработки радиолокационных изображений включает в себя такие этапы, как интерпретация, калибровка, нормализация изображений. Кроме того, при исследовании явлений и процессов на поверхности океана может применяться спектральная обработка.

Под интерпретацией понимается объяснение наблюдаемых контрастов яркости, определение сигнатур (т.е. структур, имеющих характерные форму, размеры и контрасты) и соотнесение форм сигнатур с определенными типовыми формами, создаваемыми известными процессами в океане и атмосфере. Интерпретации предшествует количественная обработка, заключающаяся в определении числовых характеристик — величин контрастов, размеров и других геометрических параметров сигнатур.

Основным компонентом калибровки, предваряющей дальнейшую работу с РЛИ, является преобразование элементов изображения из условных единиц в абсолютные значения сечения рассеяния. Получение абсолютных значений облегчает интерпретацию, так как модели воздействия различных процессов на поверхность (и тем самым — на РЛ-сигнал) оперируют именно со значениями сечений рассеяния.

Значения яркости изображений РСА космических аппаратов ERS-2 и Envisat представляются целыми числами от 0 до 32 768 для двухбайтного представления и от 0 до 255 для однобайтового формата. Как правило, это значение представляет собой квадратный корень из интенсивности изображения. Можно указать следующие основные правила преобразования яркости:

- значение пиксела прямо пропорционально квадратному корню из интенсивности изображения;
- значение интенсивности пропорционально радиолокационной яркости β_0 ;
- радиолокационная яркость прямо пропорциональна коэффициенту обратного отражения σ_0 , деленному на синус угла падения.

Таким образом,

$$[DN]^2 = K\beta_0 = \frac{K\sigma_0}{\sin(\alpha)} = K(\alpha)\sigma_0,$$

где DN — значение яркости исходного изображения; K — калибровочная константа; α — локальный угол визирования; $K(\alpha)$ — калибровочная константа, зависящая от локального угла визирования: $K(\alpha) = K \sin(\alpha_{ref}) / \sin(\alpha)$; (α_{ref}) — опорный локальный угол визирования.

Калибровочные константы различны для разных типов продуктов и записываются в заголовке со служебной информацией. Значения яркостей изображений переводятся в шкалу нормализованного коэффициента обратного рассеяния σ° по следующей формуле:

$$\sigma^\circ = 20 \log_{10}(DN)K.$$

В ряде случаев слабоконтрастные, с трудом различимые на снимках структуры могут быть выявлены путем специальной обработки радиолокационных изображений — нормализации. Разумеется, такая обработка способна лишь усилить контраст видимых аномалий, позволяя уточнить их положение, форму и размеры, но не позволяет обнаруживать того, чего на изображении нет. Основные элементы этой обработки — сглаживание тренда, фильтрация, манипуляции с гистограммами. Обработка такого рода носит отчасти субъективный характер, а критерием служит визуальное качество изображения.

Под нормализацией изображений в методике обработки радиолокационных изображений подразумеваются три операции:

- выравнивание тренда по наклонной дальности (по мере необходимости);
- усиление контраста радиолокационных изображений;
- географическая привязка и трансформирование изображения в географическую проекцию.

Под поперечным трендом понимается зависимость коэффициента обратного рассеяния от дальности, обусловленная изменением σ° с углом визирования. Наклон поперечного тренда зависит от скорости ветра. Тренд можно устранять двумя способами: на основе теоретической зависимости σ° от угла визирования и по реальным данным. В первом требуется достаточно точно знать скорость и направление ветра. На основе этих данных строится теоретическая зависимость и по ней проводится коррекция. Во втором способе поперечный тренд устраняется по кривой, получаемой из реальных значений изображения путем усреднения значений яркости в каждом столбце дальности по всем строкам азимута.

Недостатком как первого, так и второго способов устранения тренда является чувствительность к вариациям скорости ветра по полю изображения. Иными словами, при больших вариациях скорости ветра по полю изображения наблюдаются большие вариации σ° , так что данный способ коррекции тренда становится непригодным.

Усиление контраста радиолокационных изображений — необходимая операция для интерпретации изображений. Она проводится, как правило, в сочетании со сглаживанием (низкочастотной фильтрацией). Сглаживание изображения выполняется окнами с размером 3×3 , 5×5 или иным количеством пикселей.

При необходимости точной пространственной привязки наблюдаемых явлений производится перевод РЛ-изображений в географическую проекцию. Это может быть осуществлено в среде различных геоинформационных систем, таких, как ENVI, VISat, ERDAS Imagine, ARCInfo и др.

2.2. ОСНОВЫ МЕТОДА СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования поверхности Земли с борта космического аппарата. Не вдаваясь в детали устройства самого альтиметра, остановимся на основах этого метода зондирования подстилающей поверхности.

2.2.1. Развитие спутниковой альтиметрии

Развитие спутниковой альтиметрии условно можно разделить на три этапа (*Лебедев, Костяной, 2005; Benveniste, 2011*).

Первый этап (с 1974 по 1980 г.) — спутниковые программы Skylab-IV, GEOS-3 и SEASAT, связанные с исследованием потенциальной возможности использования спутниковой альтиметрии, в первую очередь в геодезии. Эксперименты были направлены на решение задачи изучения средней поверхности Мирового океана, отождествляемой, при некоторых предположениях, с поверхностью геоида. Это связано с тем, что плотность гравиметрических измерений в Мировом океане меньше по сравнению с измерениями на суше.

Второй этап (с 1985 по 1992 г.) — проведение целенаправленных спутниковых экспериментов GEOSAT и ГЕОИК для решения геодезических задач и исследования возможностей применения спутниковых альтиметрических измерений в других науках о Земле (океанологии, гляциологии, гидрологии и т. д.).

Третий этап (с 1993 г. по настоящее время) — постоянный мониторинг водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей (спутники ERS 1/2, TOPEX/Poseidon, GFO-1, Jason 1/2, Envisat и др.), изучение полярных льдов и поверхности Земли (спутники ICESat и CryoSat 1/2).

Параметры орбит и общие характеристики перечисленных спутниковых миссий приведены в табл. 2.6 (см. с. 47–48), а основные характеристики установленных на них альтиметров и точность расчета высоты морской поверхности — в табл. 2.7 (см. с. 49).

2.2.2. Геодезические и изомаршрутные программы

Основные программы спутниковой альтиметрии можно условно разделить на два типа. Первые направлены на решение геодезических задач: уточнение формы и высот геоида и гравитационного поля Земли. Они получили название геодезических программ. Вторые — на осуществление мониторинга изменчивости высоты морской поверхности. Круг задач, которые могут решаться в рамках этих программ, достаточно широк — от различных океанологических задач до исследований глобальных изменений климата. Эти программы получили название изомаршрутных.

Для решения геодезических задач параметры орбиты подбираются таким образом, чтобы плотность покрытия подспутниковыми трассами (треками) Мирового океана была максимальной — в пределах нескольких километров (рис. 2.10а, см. с. 50).

Таблица 2.6. Основные программы спутниковых альтиметрических измерений

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты		Период повто- ряемости ¹ , сут	
			Высота, км перигей	Наклонение, град		
Skylab-4 (орбитальная станция)	05/1973–02/1974	20847	422	437	130,0	–
GEOS-3	04/1975–12/1978	341	817	858	115,0	–
SEASAT	07/1978–09/1978	2300	761	765	108,0	17
	09/1978–10/1978					3
GEOSAT	03/1985–11/1986	635	775	779	108,1	~23
	11/1986–12/1989					17
Изомаршрутная программа						
ГЕОИК 1 ² («Космос-1660»)	07/1985–10/1986	1500	1482	1525	73,6	–
ГЕОИК 2 ² («Космос-1732»)	03/1986–03/1986	1500	1480	1525	73,6	–
ГЕОИК 3 ² («Космос-1803»)	12/1986–12/1987	1500	1497	1504	82,6	–
ГЕОИК 4 ² («Космос-1823»)	03/1987–10/1987	1500	1479	1524	73,6	–
ГЕОИК 5 ² («Космос-1950»)	06/1988–07/1990	1500	1484	1522	73,6	–
ГЕОИК 6 ² («Космос-2037»)	09/1989–09/1990	1500	1485	1524	73,6	–
ГЕОИК 7 ² («Космос-2088»)	08/1990–03/1993	1500	1484	1524	73,6	–
ERS-1	07/1991–11/1991	2384	774	775	98,5	3
Фаза В	11/1991–03/1992					3
Фаза С	04/1992–12/1993					35
Фаза D	12/1993–04/1994					3
Фаза E ¹	04/1994–09/1994					~168
Фаза F ¹	09/1994–03/1995					~168
Фаза G	04/1995–06/1996					35
ТОРЕХ/Poseidon	08/1992–01/2006	2402	1331	1344	66,04	10
ГЕОИК 8 ² («Космос-2226»)	01/1993–07/1993	1500	1479	1525	73,6	–

Окончание табл. 2.6

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
			Высота, км перигей	Наклонение, град	Период повто- ряемости ¹ , сут	
ГЕОИК 9 ² («Гео-ИК»)	12/1994–07/1995	1500	1481	1526	73,6	–
ERS-2	04/1995–06/2002	2516	784	785	98,6	35
GFO-1	02/1998–09/2008	410	786	788	108,1	17
Jason-1	12/2001 – настоящее время	500	1337	1343	66,04	10
Epvisat	03/2002 – настоящее время	7991	783	785	98,6	35
ICESat ²	01/2003 – настоящее время	1000	593	610	94,0	183,8
CryoSat-1 ²	10/2005 – потерян при выво- де на орбиту	650	720		92,0	~369
Jason-2 (OSTM)	06/2008 – настоящее время	525	1324	1335	66,04	10
CryoSat-2 ²	04/2010 – настоящее время	650	720		92,0	~369
САДКО (Poseidon-2)	12/2010 – настоящее время	1500	1347		73,6	17
HY-2	Геодезическая программа	513	963,6	965	99,3	~168
	Изомаршрутная программа					14
SARAL/AltiKa	Планируется на 03/2012	600	800		98,705	35
Sentinel-3 – Ocean	Планируется на 11/2012	2300	693		98,6	35
Jason-3	Планируется на 2013–2014 гг.	500	1336		66,0	10
SWOT (Surface Water and Ocean Topog- raphy)	Планируется на 2013–2016 гг.	500	1336		66,0	10

¹ Для изомаршрутных программ.² Геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель).

Таблица 2.7. Технические характеристики основных радиоальтиметров и точность расчета высоты морской поверхности

Параметр	Альтиметр												
	GEOSAT	RA	TOPEX/NRA	Poseidon-1	GFO-RA	Poseidon-2	RA2	Poseidon-3					
Рабочая частота, ГГц	13,5	13,8	13,575	5,3	13,65	13,5	13,575	5,3	13,575	3,2	13,575	5,3	
Длительность импульса, нс	3,125	12,121 ¹ 3,030	3,125	10	3,125	3,125	3,125	10	50	12,5	3,125	10	3,125
Частота повторения импульсов, МГц	500	1020	4200	1220	1718	500	1795,33	2060	448,83	2060	2060	2060	
Диаметр антенны, м	1,2	1,2	1,5	1,2	1,2	1	1,5	1,2	1,5	1,2	1,5	1,2	
Угловое разрешение антенны альтиметра, град	1,3	1,3	1,1	2,7	1,1	2	1,29	3,4	5,5	1,28	5,5	3,4	
Спутник-носитель	GEOSAT	ERS-1, ERS-2	TOPEX/Poseidon	GFO-1	Jason-1, «Садко»	Envisat	Jason-2	Jason-2	Jason-2	Jason-2	Jason-2	Jason-2	
Высота орбиты, км	800	780	1336	880	1336	880	800	1336	800	1336	1336	1336	
Точность расчета высоты морской поверхности, см	10	5,5	1,7	3	3,5	1,7	1,8	4,5	1,7	1,8	4,5	1,7	

¹ Первая для профилирования морских льдов и ледников Гренландии и Антарктиды, вторая — для измерения высоты морской поверхности.

Изомаршрутные программы предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период (цикл) времени (см. рис. 2.10б, с. 51). Они позволяют реализовать режим повторных измерений по сетке равномерно расположенных по поверхности Земли треков. Изомаршрутные программы направлены в первую очередь на решение задач мониторинга пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности или уровня океана.

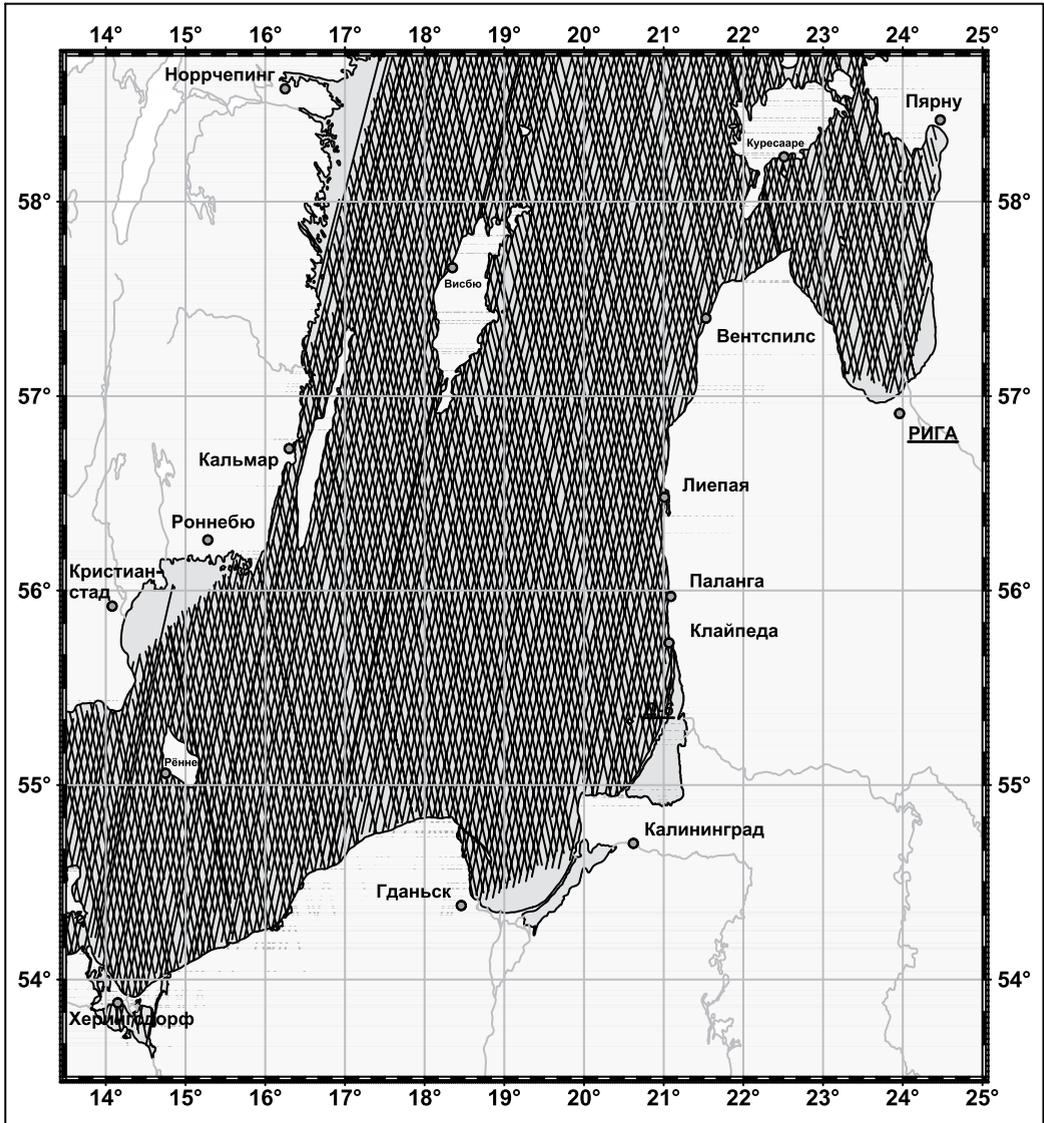


Рис. 2.10а. Расположение треков геодезической программы спутника ERS-1 (фазы Е и F) (период повторяемости около 168 сут) на акваториях центральной и южной частей Балтийского моря

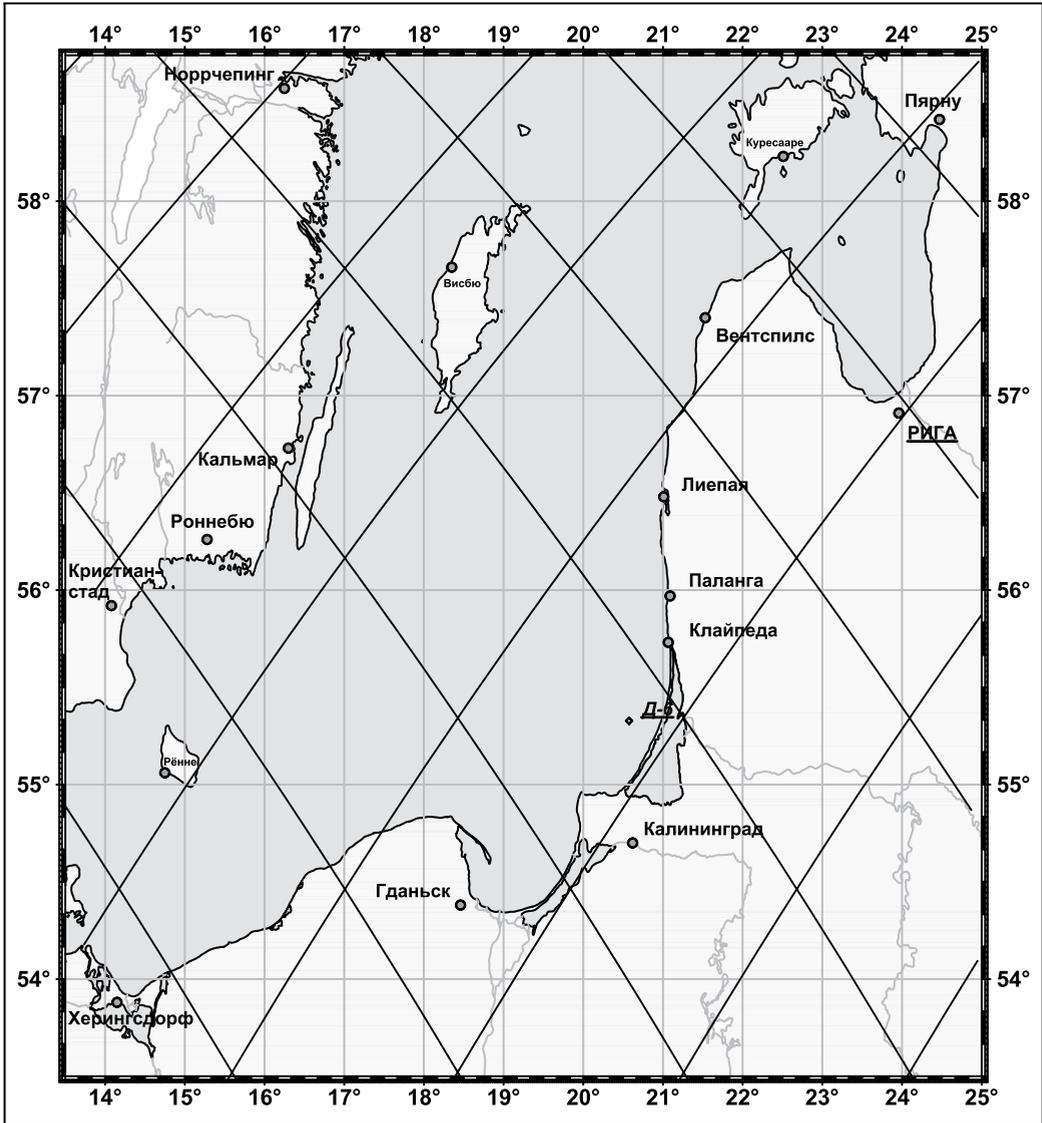


Рис. 2.10б. Расположение изомаршрутных программ спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason 1/2 (J 1/2) (период повторяемости около 10 сут) на акваториях центральной и южной частей Балтийского моря

Подспутниковые трассы для тех или иных программ имеют разные расстояния между треками одного типа (восходящими или нисходящими¹ в зависимости от широты места. На рис. 2.11 (см. с. 52) представлена зависимость расстояния между треками вдоль параллелей от широты для различных изомаршрутных программ.

¹ Восходящими называются треки, вдоль которых спутник движется по направлению на север, нисходящими — на юг.

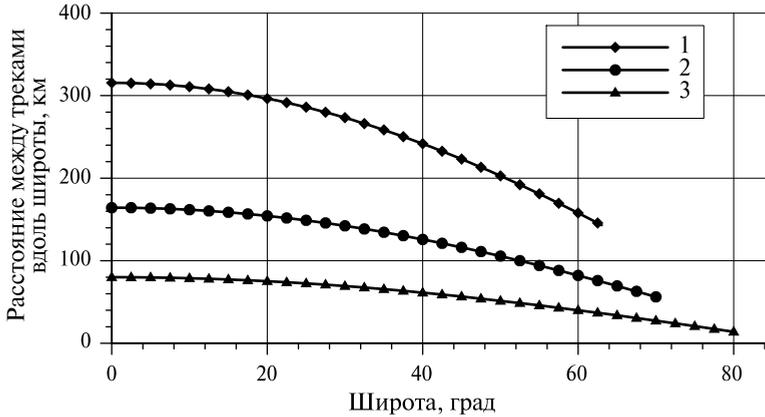


Рис. 2.11. Зависимость расстояния между треками одного типа вдоль параллелей от широты для различных изомаршрутных программ: 1 — спутники Т/Р и J 1/2 (период повторяемости около 10 сут); 2 — спутники SEASAT, GEOSAT и GFO-1 (17 сут); 3 — спутники ERS-1 (фазы С и G), ERS-2 и Envisat (35 суток)

2.2.3. Геометрия метода

Геометрия измерений, проводимых альтиметром или радиовысотометром, представлена на рис. 2.12 (см. с. 53). На нем показаны различного рода поверхности.

Поверхность, относительно которой определяются все остальные, называется отсчетным эллипсоидом, или эллипсоидом вращения, центр которого совпадает с центром тяжести Земли.

Высота морской поверхности относительно отсчетного эллипсоида рассчитывается по высоте спутника над морем h_{alt} , полученной в результате обработки данных спутниковой альтиметрии, и по высоте орбиты h_{orb} самого спутника $h_{ssh} = h_{orb} - h_{alt}$.

Помимо высоты морской поверхности для решения многих задач используются аномалии высоты морской поверхности $h_{ssha} = h_{ssh} - h_{mss}$, которые определяются как отклонение от средней высоты морской поверхности h_{mss} .

Средняя высота морской поверхности (СВМП) рассчитывается путем осреднения данных, полученных в результате альтиметрических измерений одного или нескольких спутников (Лебедев, Костяной, 2005). Она максимально приближена к невозмущенной поверхности океана или геоиду. Теоретически в ней содержится информация о средней циркуляции океана.

Одна из основных поверхностей, играющих решающую роль в геодезии — геоид, который по сути является эквипотенциальной (уровенной) поверхностью гравитационного поля Земли, совпадающей с невозмущенной поверхностью океана (Пеллинен, 1985).

Уточнение высот геоида h_{geoid} в открытом океане (или его формы) является одной из основных задач, для решения которой призвана спутниковая альтиметрия.

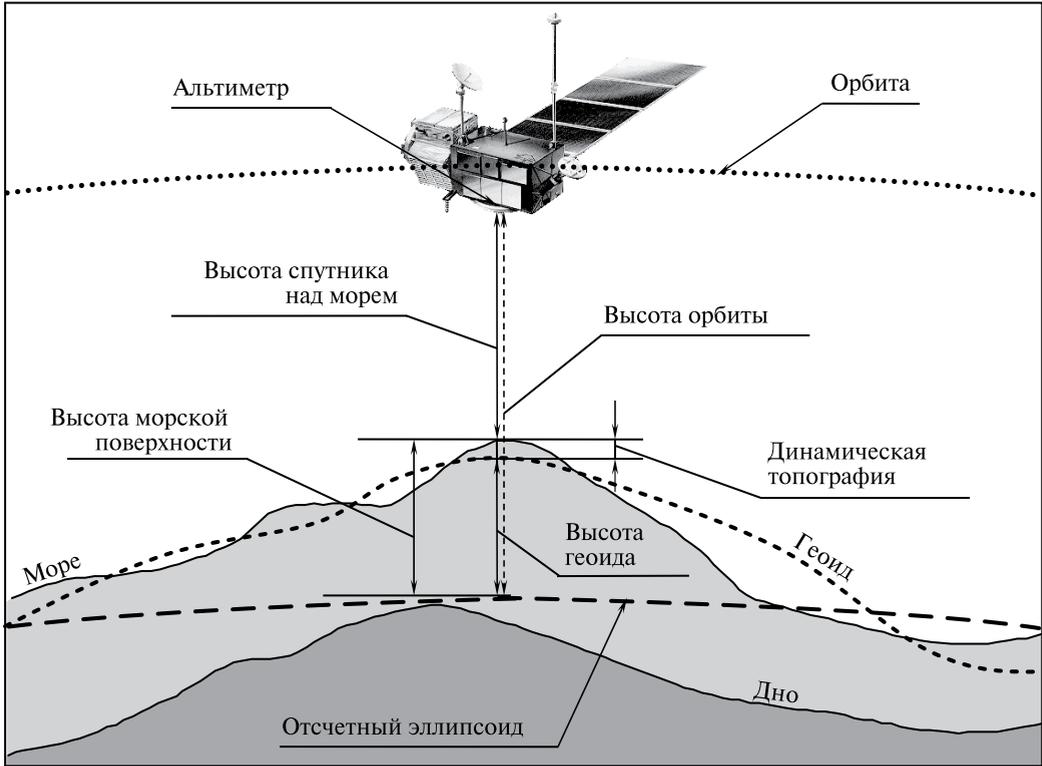


Рис. 2.12. Принципиальная схема альтиметрических измерений и основные поверхности, связанные с ними

Отклонение морской поверхности h_{ssh} от геоида в силу его определения (как невозмущенной поверхности океана) называется динамической топографией $h_{dyn} = h_{ssh} - h_{geoid}$. В океанологии существует аналогичное понятие — уровень океана. Он определяется как отклонение поверхности воды от невозмущенной поверхности океана, за которую при математическом моделировании динамики океана принимают поверхность $z = 0$ (Марчук, Саркисян, 1988).

Для более корректного расчета высоты морской поверхности необходимо учитывать ряд поправок dh (речь о которых пойдет ниже), связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности $h'_{ssh} = h_{orb} - h_{alt} - \sum dh$.

Часто для решения многих задач из данных спутниковой альтиметрии требуется исключить высоты морских приливов h_{tide} . Для этого используют понятие уровня моря h_{sl} , которое определяется как $h_{sl} = h_{ssh} - h_{tide}$.

Следует обратить внимание, что данное определение уровня моря отличается от принятого в океанологии. Первый рассчитывается относительно отсчетного эллипсоида, второй — относительно невозмущенной поверхности океана ($z = 0$).

2.2.4. Физические основы метода

Основные преимущества зондирования подстилающей поверхности в микроволновом диапазоне связаны с высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу. В результате наблюдения могут проводиться в любое время суток, практически в любую погоду, в том числе при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Это справедливо не только для спутниковой альтиметрии, но и для других активных методов дистанционного зондирования.

Рабочая частота альтиметра. Выбор диапазона рабочей частоты альтиметра определяется особенностями распространения радиоволн в атмосфере. При зондировании из космоса нижняя граница диапазона определяется частотой f_u , которая ограничена снизу максимальной плазменной частотой ионосферы f_0 , связанной с максимальной концентрацией электронов N_{max} соотношением (Гинзбург, 1967)

$$f_u \geq f_0 = 9 \cdot 10^3 \sqrt{N_{max}}.$$

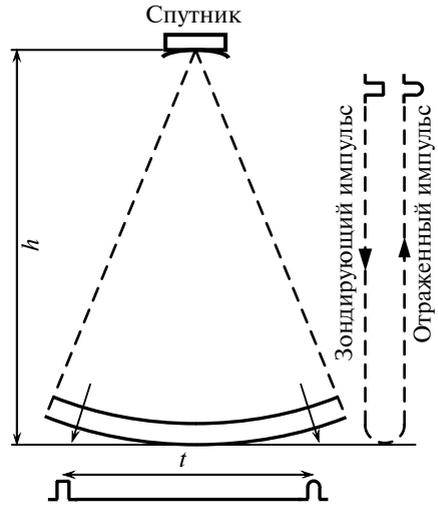
Максимальная концентрация электронов в атмосфере равна $N_{max} = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, поэтому минимально возможная частота зондирующего радиоимпульса превышает величину $f_u = 1,2 \cdot 10^7$ Гц, что соответствует длине волны $\lambda \approx 25$ м. Верхняя граница диапазона зондирования из космоса ограничена частотной характеристикой водяного пара. Несмотря на то, что водяной пар имеет линии поглощения, соответствующие длинам волн 1,35; 0,163; 0,092 см, его считают плохо прозрачным на частотах более $3 \cdot 10^{11}$ Гц (Поляков, 1995). Таким образом, диапазон волн дистанционного зондирования из космоса определяется неравенством $0,1 < \lambda < 10^3$ см. В этот диапазон попадают и волны, соответствующие линиям поглощения других газов, например кислорода ($\lambda \approx 0,5$ см).

В сантиметровом диапазоне при нормальной влажности ($\sim 7,5 \text{ г/м}^3$) имеется несколько окон прозрачности, в которых поглощение энергии радиоимпульса минимально. Альтиметры, расположенных на борту спутников (см. табл. 2.7), работают на частотах в S, C и Ku диапазонах, которые совпадают с соответствующими окнами прозрачности атмосферы.

Диаграмма направленности антенны альтиметра. Задача мониторинга водной поверхности Мирового океана потребовала от радиоальтиметров пространственного разрешения для расчета высоты поверхности моря не более 5 км, что составляет 1/10 от характерного радиуса деформации Россби в океане для умеренных широт (Монин, Жихарев, 1990; Chelton et al., 2007).

Такое разрешение могло быть достигнуто за счет уменьшения ширины диаграммы направленности антенны радиоальтиметра. Оценки показывают, что разрешение 5 км достигается при длине волны зондирующего импульса 2 см, высоте спутника 1000 км и большом диаметре антенны 5 м. При этом ширина диаграммы направленности антенны мала, составляет около $0,004^\circ$, что дает большие погрешности, связанные с определением положения точки надира. Так, отклонение антенны на $0,04^\circ$ дает ошибку в определении высоты 20 см (Chelton et al., 1989). Эти недостатки устраняются за счет применения радиоальтиметров со сравнительно широкой диаграммой направленности ($1-2^\circ$). При этом высокое пространственное разрешение достигается за счет использования малой длительности зондирующих импульсов (см. табл. 2.7).

Рис. 2.13. Принципиальная схема работы альтиметра (h — высота спутника над подстилающей поверхностью, t — время между пуском зондирующего импульса и возвратом отраженного сигнала)



Более подробно о технических характеристиках разработанных до настоящего времени альтиметров можно ознакомиться в работе (Dumont et al., 2006) и табл. 2.7.

Определение расстояния от альтиметра до подстилающей поверхности. Физические основы метода спутниковой альтиметрии достаточно просты. Зондирующий импульс, фронт которого является сферическим, посылается вертикально вниз, отражается от подстилающей поверхности (вода, суша или лед) и возвращается назад к антенне альтиметра. По разнице времени между моментом посылки радиоимпульса и его возврата t рассчитывается расстояние от спутника до подстилающей поверхности (рис. 2.13):

$$h = \frac{ct}{2},$$

где c — скорость света.

Согласно данной формуле время, за которое импульс альтиметра достигает антенны, определяется как

$$t = \frac{2h}{c}.$$

Так, для спутников TOPEX/Poseidon и Jason 1/2 средняя высота над подстилающей поверхностью на экваторе составляет $h = 1336$ км (см. табл. 2.6). Время, за которое зондирующий импульс достигает подстилающей поверхности (или время возврата отраженного импульса), составляет $t = 8,91 \cdot 10^{-3}$ с. Следовательно, время посылки зондирующего импульса и возврата отраженного сигнала должны быть определены с точностью не менее 10^{-8} с. В свою очередь, точность спутниковых часов должна быть лучше, чем $0,5 \cdot 10^{-9}$ с (Smith et al., 1994).

Для океанологических исследований отклонение высоты морской поверхности dh_{ssh} должно определяться с точностью не менее 3 см. Исходя из этого, длительность зондирующих импульсов τ должна удовлетворять условию $\tau \leq 2h_{ssh}/c$ и соответственно $\tau \leq 2 \cdot 10^{-10}$ с (Chelton et al., 2001; Seelye, 2004).

Площадь сегмента отражения. В силу сферичности формы фронта зондирующего импульса, его отражение от зеркальной поверхности происходит с сегмента, имеющего форму круга, максимальный диаметр которого D_s (рис. 2.14, см. с. 56) определяется как:

$$D_s = 2h \sin \theta,$$

где θ — угловое разрешение антенны альтиметра, зависимость которого от диаметра антенны альтиметра (D_a) и длины волны радиоимпульса (λ) определяется как

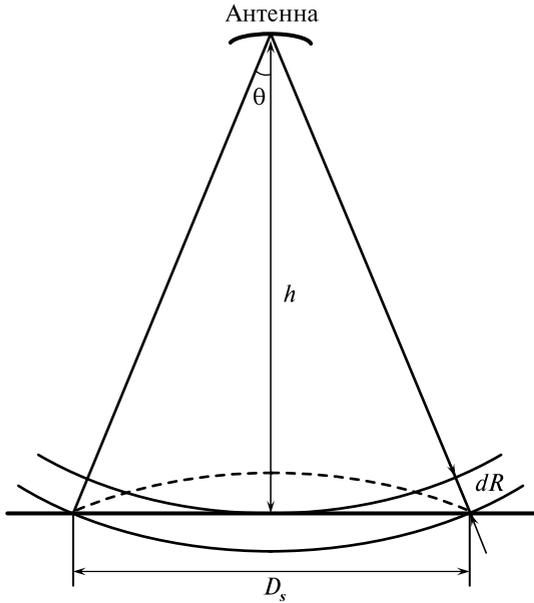


Рис. 2.14. Схема зондирования подстилающей поверхности импульсами: h — высота спутника над подстилающей поверхностью; θ — угловое разрешение антенны альтиметра; D_s — диаметр сегмента отражающей поверхности; dR — расстояние между передним и задним фронтами зондирующего импульса. Штриховой линией показан передний фронт отраженного радиоимпульса

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D_a} .$$

Таким образом, максимальный диаметр сегмента подстилающей поверхности можно определить следующим образом:

$$D_s = 2,44h \frac{\lambda}{D_a} . \quad (2.6)$$

Так, для альтиметров TOPEX NRA, Poseidon-2/3, расположенных на борту спутников Т/Р и J 1/2, для рабочей частоты 13,575 ГГц длина волны составляет $\lambda = 2,205$ см, а диаметр антенны Т/Р — $D_a = 1,5$ м. Следовательно, максимальный диаметр сегмента, с которого отражается одиночный импульс, в соответствии с (2.6) не превышает $D_s = 48,1$ км.

Практически зондирование подстилающей поверхности производится импульсом с длительностью τ . Поэтому размеры сегмента подстилающей поверхности, от которого отражается радиоимпульс, определяются не только расстоянием от спутника до поверхности, но и временем t_0 , когда передний фронт зондирующего импульса касается поверхности, и временем $t_0 + \tau$, когда его задний фронт достигает поверхности (рис. 2.15, см. с. 57). В этом случае диаметр D_s сегмента отражающей поверхности определяется как:

$$\left(\frac{D_s}{2} \right)^2 + h^2 = (h + dR)^2 = h^2 + dR^2 + 2hdR ,$$

где dR — расстояние между передним и задним фронтами зондирующего импульса, которое определяется через длительность зондирующего импульса $dR = c\tau$. Учитывая, что величина $dR^2 \ll h^2$, в итоге получаем:

$$D_s = 2\sqrt{2hdR} = 2\sqrt{2hc\tau} . \quad (2.7)$$

После касания зондирующим импульсом подстилающей поверхности в момент времени t_0 происходит расширение сферического сегмента, с которого происходит отражение, с последующим вырождением его до кольца (см. рис. 2.15). Именно по этой причине на практике площадь сегмента отражающей поверхности определяется по времени, соответствующему половине амплитуды отраженного сигнала (Chelton et al., 2001; Remote sensing..., 2003). В случае зеркального отражения оно равно

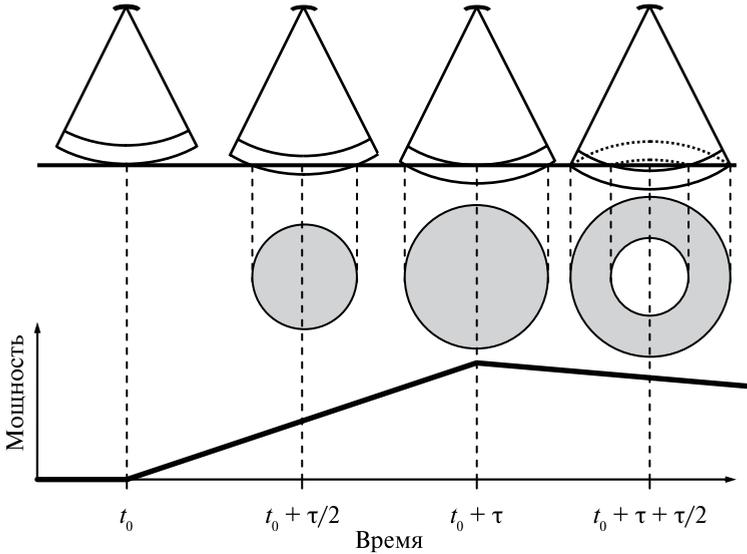


Рис. 2.15. Зависимость формы и площади сегмента подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра, от времени: t_0 — время касания поверхности первым импульсом; τ — длительность зондирующего импульса. Форма отраженного сферического сигнала соответствует зеркальному отражению

$t_0 + \tau/2$. Это время и считается временем отражения зондирующего импульса от подстилающей поверхности. Таким образом, выражение (2.7) принимает вид:

$$D_s = 2\sqrt{hct} . \quad (2.8)$$

Для альтиметров спутников Т/Р и J 1/2 длительность зондирующего импульса составляет $\tau = 3,25$ нс. В соответствии с выражением (2.8), диаметр сегмента подстилающей поверхности, от которого происходит отражение радиоимпульса, получается равным $D_s = 228,18$ м. Его площадь для одиночного импульса соответственно составляет $716,86 \text{ м}^2$, что значительно меньше максимальной величины, определяемой соотношением (2.6), т. е. конструкцией самого альтиметра.

Дальнейшая обработка данных альтиметра проводится осреднением форм отраженного импульса за различные интервалы времени. Это приводит к увеличению площади сегмента подстилающей поверхности, с которой альтиметр получает информацию (рис. 2.16, см. с. 58).

Так, спутники Т/Р и J 1/2 движутся по орбите со скоростью 7,2 км/с, которой соответствует скорость $V = 5,8$ км/с вдоль трека. Площадь сегмента, с которой происходит отражение зондирующего спутника, в этом случае рассчитывается как:

$$S = R_l D_s + \pi D_s^2 / 4 ,$$

где R_l — расстояние, которое пролетел спутник за время осреднения t_{avr} и которое равно $R_l = Vt_{avr}$.

В базах данных альтиметрии спутников Т/Р (TOPEX/Poseidon..., 1991; AVISO, 1996; Benada, 1997), Jason-1 (Picot et al., 2003) и Jason-2 (Dumont et al., 2009) представлены

данные с односекундным осреднением и ряды с интервалами осреднения 0,1 с для первого спутника (является стандартным для всех других) и 0,05 с для второго. За это время спутник пролетает соответственно 96,66; 9,66 и 4,83 м. При таком осреднении суммарная площадь, с которой получена информация, соответственно составляет $22,78 \cdot 10^3$; $2,92 \cdot 10^3$ и $1,82 \cdot 10^3$ м².

Анализ формы отраженного импульса. Отражение радиолокационного сигнала альтиметра можно разделить на зеркальное от больших объектов и случайное (*Moore, Williams, 1957; Поляков, 1995*).

Зеркальное отражение имеет место, когда отражающая поверхность представляет собой плоскость или зеркало. В этом случае форма отраженной волны идентична форме излученной волны. Отражение от больших объектов соответствует случаю, когда отражающая поверхность представляет собой несколько различных участков, от которых происходит зеркальное отражение. Для обработки данных спутниковых альтиметров эти модели отражения требуют учета нелинейных эффектов (*Rees, 2001; Remote sensing..., 2003*).

Модель случайного отражения отвечает диффузионному (некогерентному) отражению. Она применима к местности со случайным расположением рельефа, причем среднеквадратичные перепады высот должны быть значительно больше длины волны зондирующего импульса. Классическим примером подстилающей поверхности для такого типа отражения могут служить лесные массивы. Для морской поверхности модель случайного отражения применима в предположении, что среднеквадратичные высоты морских волн значительно больше длины волны радиоимпульса, радиус корреляции меньше, чем размеры облучаемой зоны и величины обратного углового отражения и облучения симметричны по азимуту (*Miller, 1979*).

Отражаясь от морской поверхности, фронт волны деформируется и некогерентно (по мощности) рассеивается обратно в направлении спутника (*Басс, Фукс, 1972*). Таким образом, принимаемые альтиметром сигналы оказываются чрезвычайно нерегулярными. Осреднение большого количества независимых импульсов позволяет уменьшить эти ошибки (*Chelton et al., 2001*).

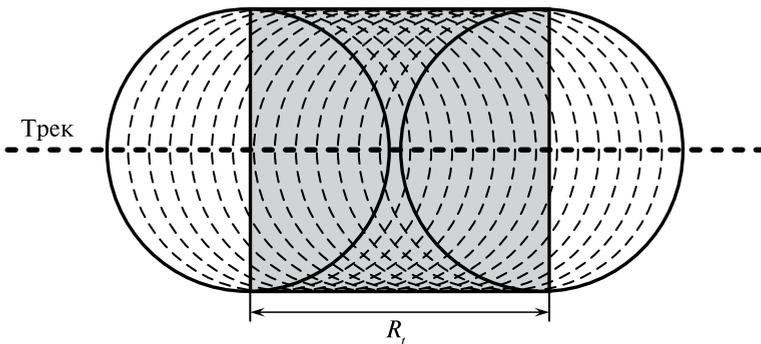


Рис. 2.16. Изменение площади сегмента подстилающей поверхности, с которого поступает информация, за счет осреднения по времени: R_t – расстояние, пролетаемое спутником вдоль трека за время осреднения t_{avr}

Для расчета высоты спутника над подстилающей поверхностью необходимо провести процедуру ретрекинга, которая позволяет на основании анализа формы отраженного импульса определить время отражения импульса от подстилающей поверхности.

Форма принятого альтиметром отраженного сигнала аппроксимируется известной формулой Брауна (*Brown, 1977*), вывод которой базируется на модели некогерентного (по мощности) рассеяния радиоволн шероховатой поверхностью. В работах (*Brown, 1977; Barrick, Lipa, 1985*) показано, что мощность отраженного сигнала определяется выражением

$$P_i(t) = P_0 \iint \frac{G^2(\theta) \sigma(x, y, \theta)}{r^4} dA \int_{-\infty}^{\infty} p \left(t_1 - \frac{2r}{c} \right) q \left(x, y, \frac{c}{2}(t - t_1) \right) dt_1, \quad (2.9)$$

где $G(\theta)$ — диаграмма направленности антенны; θ — угловое разрешение антенны альтиметра; $\sigma(x, y, \theta)$ — сечение обратного рассеяния на единицу площади; r — расстояние от антенны до элементарной области dA на поверхности; $p(r, t)$ — форма излученного импульса; $q(x, y, t)$ — плотность вероятности высоты зеркальных (рассеивающих) точек.

Проведенные в работах (*Brown, 1977; Троицкая и др., 2010*) преобразования выражения (2.9) для случая малого углового разрешения антенны альтиметра ($\theta \ll 1$) и малого отклонения оси антенны от положения надира ($\xi \ll 1$) дают следующее выражение для формы сигнала, отраженного от безграничной подстилающей поверхности:

$$P \left(t - \frac{2h}{c} \right) = \frac{P_0 \sigma^0}{2h^4} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha \right) \frac{(ct-2h)}{h}} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(ct-2h)}{\sqrt{2} \sqrt{s^2 + c^2 \tau}} \right) \right) \times \\ \times e^{-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi - \frac{c}{h} \left(t - \frac{2h}{c} \right) \left(\frac{4}{\gamma} \cos^2 \xi + \alpha \right)} I_0 \left(\frac{4}{\gamma} \sin 2\xi \sqrt{\frac{c}{h} \left(t - \frac{2h}{c} \right)} \right), \quad (2.10)$$

где h — среднее расстояние от спутника до поверхности; γ — эффективная ширина диаграммы направленности антенны; α — эффективная ширина диаграммы рассеяния; s — средняя высота шероховатости подстилающей поверхности; τ — длительность зондирующего импульса.

На рис. 2.17 (см. с. 60) показана форма импульса, описываемого преобразованной формулой Брауна (2.10), которая обычно используется для аппроксимации сигнала, отраженного водной поверхностью в условиях открытого океана в стандартных алгоритмах ретрекинга Ocean 1/2 (*Dumont et al., 2001*). На этом рисунке один телеметрический гейт для альтиметров TOPEX NRA, Poseidon 2/3, расположенных на борту спутников Т/Р и J 1/2, соответствует временному интервалу 3,125 нс. При стандартном алгоритме обработки время прихода отраженного сигнала лежит в интервале 31–33-й гейт данного графика.

Путем аппроксимации формы отраженного импульса формулой Брауна в рамках соответствующих алгоритмов ретрекинга определяются его основные параметры: τ_0 — ширина переднего фронта; $t_1 = t_0 + \tau_0/2$ — среднее время задержки импульса, отраженного от подстилающей поверхности; A_{\max} — максимальное значение его мощности (см. рис. 2.17) и s — средняя высота шероховатости подстилающей поверхности. Они позволяют найти соответственно высоту спутника

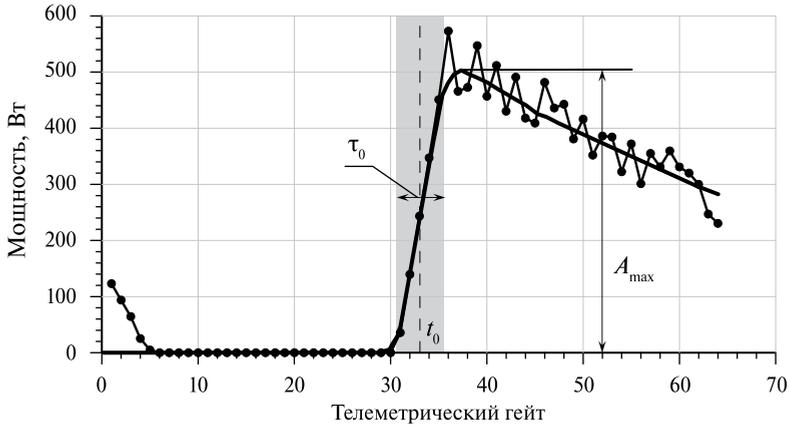


Рис. 2.17. Форма импульса, отраженного от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле (2.10) (сплошная линия) и осредненная за 1 с; форма отраженного альтиметрического импульса для условий открытого океана (маркеры). Серой областью выделена ширина переднего фронта отраженного импульса

над поверхностью воды $h + (t_0 c)/2$, сечение обратного рассеяния σ , которое в случае морской поверхности, зависит в основном от скорости приводного ветра, и значимую высоту волн¹ $h_{swh} = 2s$.

Первые результаты обработки данных альтиметрических измерений спутника GEOS-3 показали, что ширина (а, значит, и крутизна) переднего фронта отраженного импульса зависит от значимой высоты ветровых волн (Mognard, Lago, 1979; Chelton, 1988) (рис. 2.18, см. с. 61). Анализ формы зондирующего и отраженного импульсов в предположении гауссова распределения значимых высот морских волн (Stewart, 1985)

$$G(h_{swh}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta h_{swh}}} \exp\left(-\frac{h_{swh}^2}{2\Delta h_{swh}^2}\right)$$

позволяет записать зависимость между t_0 , t_1 и h_{swh} в виде (Sandwell, Smith, 2001)

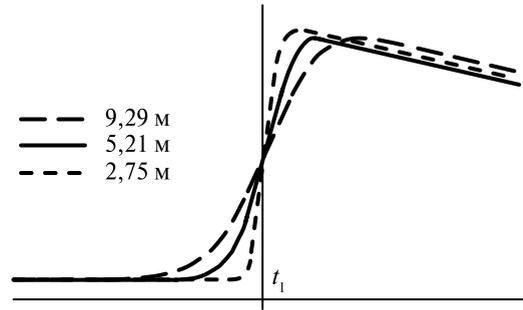
$$t_1^2 = (t_0 + \tau_0)^2 + \frac{h_{swh}^2}{c^2} \ln 2.$$

Помимо этого, в работах (Walsh et al., 1978; Walsh, 1979) представлена функциональная зависимость ширины переднего фронта отраженного импульса от высоты и угла наклона морских волн. Короткие ветровые и капиллярные волны, причиной которых является ветер вблизи водной поверхности, влияют не только на форму отраженного импульса, но и изменяют обратное рассеяние зондирующего сигнала.

Основываясь на этом эффекте, за прошлые два десятилетия было разработано несколько алгоритмов расчета скорости ветра по данным альтиметрических измерений. Они подразделяются на теоретические модели (Barrick, 1974; Jackson et al.,

¹ Значимая высота волны — это среднее арифметическое высот волн, которые выше одной третьей самой высокой волны.

Рис. 2.18. Примеры сглаженных форм отраженного импульса для различной степени волнения морской поверхности с высотой ветровых волн 9,29; 5,21 и 2,75 м (Chelton, 1988)



1992), полуэмпирические (Brown, 1979; Mognard, Lago, 1979; Brown et al., 1981) и эмпирические зависимости (Chelton, McCabe, 1985; Chelton, Wentz, 1986; Dobson et al., 1987; Witter, Chelton, 1991). Наиболее успешным был эмпирический

подход к решению данной задачи, поскольку физически обоснованная теория этого явления пока не разработана. Более подробно с ними можно ознакомиться в работе С. А. Лебедева и А. Г. Костяного (2005).

В комплекс бортовой аппаратуры всех современных спутников, проводящих альтиметрические измерения, включен многоканальный радиометр (см. разд. 2.6). В настоящее время разработан алгоритм расчета модуля скорости ветра по данным радиометра такого типа (Keihm et al., 1995):

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i T b_i ,$$

где a_i — коэффициент для i -й частоты радиометра; $T b_i$ — радиояркостная температура поверхности воды на данной частоте.

Совместное использование результатов расчета по данным радиометрии и альтиметрических измерений позволит повысить точность определения модуля скорости приповерхностного ветра.

2.2.5. Поправки на влияние атмосферы

На прохождение радиоимпульса альтиметра сильно влияет состояние атмосферы (электронное и молекулярное рассеяние и поглощение) (Chelton et al., 2001), которое может привести к увеличению времени возврата зондирующего сигнала и соответственно к ошибке определения положения спутника над поверхностью океана.

Запаздывание сигнала связано с тем, что в атмосфере происходит рефракция, обусловленная электронным и молекулярным рассеянием и поглощением.

Явление рефракции радиоимпульса в атмосфере обусловлено рассеянием молекулами воздуха (в первую очередь кислорода), поглощением водяным паром и облаками и рассеянием на свободных электронах в ионосфере.

Рассмотрим поправки, обусловленные каждым из этих явлений, отдельно: поправку на «сухую» тропосферу dh_{dry} , поправку на влажность dh_{wet} и ионосферную поправку dh_{iono} . Если первые две поправки можно определить только эмпирически, то последняя, вызванная рассеянием на свободных электронах в ионосфере, определяется из уравнений Максвелла.

«Сухая» тропосферная поправка обусловлена рассеянием радиоимпульса молекулами газов, входящих в состав воздуха, и в первую очередь кислородом (*Smith, Weintraub*, 1953). Называется она «сухой» по той причине, что молекулы воды (или водяной пар) в процессе рассеяния радиоимпульса не участвуют. Для них более присуще поглощение электромагнитного излучения.

«Сухая» тропосферная поправка прямо пропорциональна давлению воздуха на уровне моря.

Толщина атмосферы Земли имеет явно выраженную широтную зависимость. Она максимальна на экваторе и минимальна на полюсах (*Хргиан*, 1988). Следовательно, при расчете «сухой» тропосферной поправки необходимо учитывать ее зависимость от широты φ :

$$dh_{dry} = 2,277 P_s (1 + 0,0026 \cos(\varphi)).$$

Величина поправки на «сухую» тропосферу изменяется в диапазоне от 2 до 3 м. В среднем она составляет 2,3 м.

Для расчетов поправки dh_{dry} при обработке данных спутниковой альтиметрии используется давление на поверхности океана P_s , рассчитанное по модели европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF — European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Модельные расчеты проводятся на регулярной сетке с шагом 1 или 2,5° через каждые 6 ч. При этом для точки, где проводятся альтиметрические измерения, осуществляется интерполяция данных по пространству. По времени же выбирается значение атмосферного давления, ближайшее ко времени измерений.

Однако для внутренних морей или озер использование результатов модельных расчетов атмосферного давления для расчета «сухой» поправки может привести к дополнительным ошибкам при расчете высоты водной поверхности. Так, результаты первого дрейферного эксперимента, проводимого на акватории Каспийского моря с 4 октября 2006 г. по 23 февраля 2007 г. в рамках Международного проекта “Multidisciplinary Analysis of the Caspian Sea Ecosystem”, показали, что ошибка расчета dh_{dry} может достигать 2,25–3,86 см (*Lebedev, Kostianoy*, 2008b; *Kouraev et al.*, 2011).

Поправка на влажность. Введение данной поправки обусловлено содержанием водяного пара в столбе атмосферы под спутником, в котором имеет место поглощение электромагнитного излучения водяным паром.

Основное количество его сконцентрировано в нижнем двухкилометровом слое тропосферы и с высотой уменьшается почти по экспоненте (*Staelin et al.*, 1976; *Liu*, 1984; *Хргиан*, 1988). Вводя понятие эффективной температуры нижнего слоя атмосферы T_{eff} (К), которая в первом приближении может быть аппроксимирована температурой подстилающей поверхности, величина поправки на влажность dh_{wet} вычисляется как

$$dh_{wet} = \frac{1,723}{T_{eff}} W,$$

где W — интегральное содержание водяного пара в атмосфере, г/см². По оценкам, приведенным в работе (*Chelton et al.*, 1981), оно изменяется в пределах 1–6 г/см² и имеет ярко выраженную географическую и временную зависимости. Величина самой поправки на влажность изменяется в интервале от 5 до 70 см.

Интегральное содержание водяного пара в атмосфере может быть рассчитано по данным многоканального микроволнового радиометра, рабочие частоты которого

лежат вблизи частоты 22,2356 ГГц, соответствующей основной частоте поглощения электромагнитного излучения водяным паром. Точность этих расчетов составляет $0,3 \text{ г/см}^2$ (Tapley et al., 1982; Alishouse, 1983; Chang et al., 1984), что приводит к ошибке в расчетах поправки на влажность около 2 см. Величина интегральной влажности атмосферы может быть получена в результате модельных расчетов. Точность определения поправки на влажность в этом случае не превышает 5 см (Tapley et al., 1982).

По этой причине специалисты по спутниковой альтиметрии рекомендуют использовать в первую очередь поправку dh_{wet} , рассчитанную по данным сканирующего вдоль трека многоканального радиометра, который входит в комплекс бортовой аппаратуры всех спутников, работающих в настоящее время. В этом случае поправка на влажность определяется как (Jacques, 1994; Urban et al., 2001)

$$dh_{wet} = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \log(280 - Tb_i).$$

Однако следует отметить, что поправка на влажность, рассчитанная по данным сканирующего вдоль трека многоканального радиометра, имеет существенную ошибку в прибрежных районах (Obligis et al., 2011), так как этот прибор имеет пространственное разрешение около 25 км^2 .

В случае отсутствия поправки на влажность, рассчитанной по данным сканирующего вдоль трека многоканального радиометра, можно использовать поправку, рассчитанную по результатам модельных расчетов ECMWF (Jacques, 1994; Urban et al., 2001):

$$dh_{wet} = 3,73 \cdot 10^{-3} \int_0^{h_{alt}} \frac{e}{T^2} dz,$$

где e — парциальное давление водяного пара; T — температура воздуха.

Ионосферная поправка. В верхних слоях атмосферы происходит рассеяние радиопульса альтиметра свободными электронами и ионами (Альперт, 1972), что приводит к задержке времени возврата радиопульса и к увеличению расстояния от спутника до подстилающей поверхности на величину

$$dh_{iono} = \frac{40,3}{f^2} E_s, \quad (2.11)$$

где E_s — интегральная плотность электронов, эл/см^2 ; f — рабочая частота альтиметра, ГГц.

Большинство свободных электронов и ионов, на которых происходит рассеяние зондирующих импульсов, находится в верхних слоях атмосферы в пределах от 50 до 2000 км, с максимальной концентрацией на высоте около 300 км (Rush, 1986). Ионизация этой области главным образом обусловлена ультрафиолетовым излучением Солнца. Поэтому концентрация свободных электронов имеет суточную, широтную и сезонную изменчивость (Davies et al., 1980; Callahan, 1984). Она также имеет зависимость от 11-летнего цикла солнечной активности.

Средняя величина E_s располагается в интервале от 1012 до 1014 эл/см^2 (Soicher, 1986; Davies et al., 1977). Для рабочей частоты альтиметров 13,575 ГГц (см. табл. 2.7) это соответствует поправке по высоте приблизительно от 0,2 до 20 см.

Согласно (2.11), все, что требуется, чтобы определить ионосферную поправку — это величина интегральной плотности электронов в каждом положении альтиметра. Традиционно плотность электронов определяется по результатам модельных расчетов, точность которых оценивается как 3–5 см (*Lorell et al.*, 1982).

Так как ионосферная поправка зависит от рабочей частоты альтиметра, радарные измерения высотомера в двух частотах могут использоваться для оценки самой ионосферной поправки и интегральной плотности электронов (*Imel*, 1994). Погрешность поправки, рассчитанной по данной методике, имеет среднеквадратичное отклонение порядка 0,5 см (*Chelton*, 1988).

Ионосферная поправка может так же рассчитываться по данным системы доплеровского слежения (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite — DORIS*) (*Seeber*, 2003), но с намного меньшей точностью. Среднеквадратичное отклонение расчетов по данным DORIS составляет 1–3 см. Однако для некоторых районов, например, таких как западная часть Тихого океана и экваториальная часть Атлантического океана, она значительно превышает результаты модельных расчетов (*Picot et al.*, 2003).

При работе с данными спутниковой альтиметрии специалисты рекомендуют в первую очередь использовать ионосферную поправку, рассчитанную по двум частотам альтиметра. Если она отсутствует — то поправку по данным системы DORIS. И только в последнюю очередь — по результатам модельных расчетов (*AVISO*, 1996; *Benada*, 1997; *Picot et al.*, 2003; *Dumont et al.*, 2009).

2.2.6. Поправки на состояние подстилающей поверхности

Помимо учета влияния атмосферы, при расчете высоты спутника относительно подстилающей поверхности для более корректной обработки данных спутниковой альтиметрии необходимо учесть поправку, связанную с состоянием подстилающей поверхности.

Как было показано выше, высота спутника над морем рассчитывается по времени t_1 (см. рис. 2.17), а не по времени t_0 , которое соответствует моменту касания зондирующим импульсом поверхности моря. Наклон переднего фронта отраженного импульса зависит от высоты ветровых волн (см. рис. 2.18), а, следовательно, разница между временем t_0 и временем t_1 (или временной сдвиг) также зависит от значимой высоты волн. В результате получается, что фактически средняя высота морской поверхности отличается от величины, рассчитанной по времени t_1 .

Именно для учета данного явления вводится поправка на состояние подстилающей поверхности. Ее величина рассчитывается по эмпирической зависимости от значимой высоты волны и скорости приводного ветра

$$dh_{emb} = h_{swh} (a + bh_{swh} + cU + dU^2).$$

Коэффициенты a , b , c и d зависят от рабочей частоты альтиметра. Их можно найти в соответствующих разделах описаний баз данных для каждого спутника.

Для двухчастотных альтиметров (см. табл. 2.7) специалисты рекомендуют (*AVISO*, 1996; *Benada*, 1997; *Picot et al.*, 2003; *Dumont et al.*, 2009) в первую очередь учитывать поправку dh_{emb} , рассчитанную по данным более высокой частоты по алгоритму

(*Gaspar et al.*, 1994). В случае ее отсутствия — по данным более низкой рабочей частоты альтиметра по алгоритму (*Walsh et al.*, 1990). Величина данной поправки изменяется в диапазоне от 1 до 4 см.

2.2.7. Геофизические поправки

Помимо вышеперечисленных поправок, влияющих на точность расчета высоты спутника над морем, учет которых является обязательным, рассмотрим поправки, позволяющие исключить из данных спутниковой альтиметрии изменения высоты моря, обусловленные различными физическими явлениями.

Поправка обратного барометра необходима для учета изменений высоты морской поверхности, обусловленных барическим воздействием атмосферы. Она рассчитывается через атмосферное давление на уровне подстилающей поверхности P_s (мбар) как

$$dh_{inv} = -9,948(P_s - P_0),$$

где $P_0 = 1013,3$ мбар — нормальное атмосферное давление, соответствующее невозмущенной поверхности океана. Величина данной поправки может достигать 3 м.

Аналогичная процедура существует и в океанологии, когда вместо физического уровня моря рассматривают так называемый «приведенный уровень» (см., например, (*Марчук, Саркисян*, 1988)).

Приливные поправки предназначены для учета приливных явлений. Различаются океанические приливные поправки dh_{tide} , поправки на приливы в Земной коре dh_{solid} и поправки на полюсные приливы dh_{pole} .

Первые рассчитываются по глобальным моделям приливов, которые в свою очередь строятся с использованием данных спутниковой альтиметрии. С полным перечнем существующих на сегодня глобальных моделей приливов можно ознакомиться в работе (*Le Provost*, 2001). Приливы земной коры и полюсные приливы рассчитываются также по соответствующим моделям (*Cartwright, Edden*, 1973; *Wahr*, 1985).

2.2.8. Данные спутниковой альтиметрии

Данные альтиметрических измерений независимо от спутников (см. табл. 2.6) разделяются на несколько типов, а базы данных — на несколько способов организации.

В зависимости от интервала между временем проведения измерений и временем, когда данные спутниковой альтиметрии становятся доступными для пользователей, различают следующие типы данных: оперативные, промежуточные и окончательные. Скважность поступления информации связана, в первую очередь, с методом расчета высоты орбиты спутника, что влияет на точность ее расчета и, соответственно, высоты морской поверхности.

Оперативные данные (OGDR — Operational Geophysical Data Records) формируются через каждые 3–9 ч после поступления информации с борта спутника. Так как время, через которое этот тип данных доступен пользователям, достаточно мало для точного расчета высоты орбиты с применением данных навигационных систем и систем слежения, то в этих данных используется только прогноз высоты орбиты.

Для спутников ERS 1/2 и Envisat величина ошибки высоты орбиты в зависимости от времени прогноза колеблется от 15 до 40 см (Scharroo, Visser, 1998), для спутника GFO-1 — от 30 см до 1 м (Zhao et al., 2003). Несмотря на то, что для спутников T/P и J 1/2 средняя высота их орбит почти в 1,5 раза больше по сравнению с другими спутниками (см. табл. 2.6), ошибка прогноза высоты орбиты на 3 дня для них составляет от 10 до 30 см (Marshall et al., 1995; Menard, Fu, 2000; Dumont et al., 2009). Это существенно ограничивает применение OGDR-данных для анализа пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности или уровня океана.

Однако информация о высоте волн и модуле скорости приводного ветра не зависит от точности расчета орбиты, поэтому эти данные могут активно использоваться через 6–8 ч после проведения измерений.

Промежуточные данные. В течение последующих 1–2 недель высота орбиты уточняется за счет использования бортовой навигационной аппаратуры, а также радиальной составляющей ошибки, рассчитываемой по точкам пересечения (уравнивание высот орбит). Орбитальная ошибка для спутников ERS 1/2 и Envisat на этом этапе обработки спутниковой информации составляет около 10 см (Scharroo, Visser, 1998). Для спутника GFO-1 она не превышает 5–6 см (Zhao et al., 2003), а для спутников T/P и J 1/2 ошибка расчетов — менее 4 см (Marshall et al., 1995; Menard, Fu, 2000).

На этом этапе формируются промежуточные данные (IGDR — Interim Data Records). Ошибка расчета высоты орбиты в этом случае значительно ниже, что уже позволяет уверенно использовать IGDR-данные для исследований изменчивости уровня морей и океанов.

Окончательные данные. После уточнения высоты орбиты по данным наземных навигационных систем и данным глобальной системы позиционирования (GPS — Global Positioning System) точность расчета орбиты повышается. Для спутников ERS 1/2 и Envisat ошибка расчета орбиты составляет 5–7 см (Scharroo et al., 1994), для спутника GFO-1 — 5 см (Shum et al., 1999). Точность расчета высоты орбиты спутников T/P и J 1/2 на этом этапе менее 2,5 см (Marshall, et al., 1995; Menard, Fu, 2000).

Таким образом, на основании этих расчетов формируется окончательный вариант данных (GDR — Geophysical Data Records). Это повышает точность расчета высоты морской поверхности и позволяет использовать спутниковую альтиметрию для решения не только океанологических, но и геодезических задач. К сожалению, GDR-данные формируются примерно через 1–2 месяца после окончания цикла изомаршрутной программы спутника, поэтому их использование в оперативном режиме невозможно.

В табл. 2.8 (см. с. 67) представлена точность расчета орбиты и различных поправок для трех типов данных спутника Jason-2 (Menard, Fu, 2000; Jason-1..., 2003).

Базы данных спутниковой альтиметрии. Данные спутниковой альтиметрии организуются либо в виде баз данных, либо в виде полей аномалий высоты морской поверхности или уровня моря на регулярной сетке.

Первые базы данных спутниковой альтиметрии организуются в виде набора данных о высоте морской поверхности или аномалиях уровня моря вдоль трека. Они различаются между собой форматом записи (числом параметров, включенных в базу) и принципом формирования файловой системы.

Вдольтрековые данные для спутников T/P и J 1/2 можно найти на ftp-серверах PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, JPL) и AVISO (Archivage, Validation et Interpretation des donnees des Satellites Oceanographiques). Полные

каталоги данных, размещенные на этих серверах, представлены соответственно на сайтах http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/index.html и <http://www.aviso.oceanobs.com/es/data/index.html>. Эти базы данных имеют достаточно большой объем, поэтому для начинающих пользователей рекомендуем пользоваться сайтами CCAR (Colorado Center for Astrodynamics Research) http://argo.colorado.edu/~realtime/global_realtime/alongtrack.html и RADS (Radar Altimeter Database System) <http://rads.tudelft.nl/rads/data/authentication.cgi>. Преимущество этих сайтов в том, что они позволяют отобрать данные по району, временному интервалу и спутнику (ERS 1/2, Т/Р, J 1/2 и GFO-1). Аномалии уровня в виде карт можно найти на сайте CCAR и <http://argo.colorado.edu/~realtime/welcome/>.

Т а б л и ц а 2.8. Ошибки расчета орбиты и поправок для разных типов данных спутника Jason-2 (Dumont et al., 2009)

	Тип данных		
	OGDR	IGDR	GDR
Инструментальная ошибка, см	1,7	1,7	1,7
Поправка на ионосферу, см	1	0,5	0,5
Поправка на состояние подстилающей поверхности, см	3,5	2	2
«Сухая» атмосферная поправка, см	1,0	0,7	0,7
Поправка на влажность, см	1,2	1,2	1,2
Точность расчета высоты спутника, см	4,5	3	3
Точность расчета орбиты, см	10	2,5	1,5
Суммарная точность расчета высоты морской поверхности, см	11	3,9	3,4
Точность расчета значимой высоты волн	10 % или 0,5 м	10 % или 0,4 м	10 % или 0,4 м
Точность расчета скорости приводного ветра, м/с	1,6	1,5	1,5
Величина обратного рассеяния, дБ	0,7	0,7	0,7

Данные на регулярных сетках расположены на сайте AVISO.

Более подробно ознакомиться с методом спутниковой альтиметрии можно в работах (Rees, 2001; Remote sensing..., 2003; Seelye, 2004; Лебедев, Костяной, 2005; Cracknell, Hayes, 2007).

2.3. ОСНОВЫ МЕТОДА СПУТНИКОВОЙ СКАТТЕРОМЕТРИИ

Спутниковая скаттерометрия относится к активным методам дистанционного зондирования поверхности Земли. Принцип скаттерометрии основан на том, что зондирующий радиопульс, направленный под углом к морской поверхности, рассеивается из-за ее шероховатости, обусловленной ветровыми волнами. Гребни и впадины поверхности волн расположены перпендикулярно направлению ветра, что позволяет

определить кроме скорости ветра также его направление. Таким образом, часть отраженного сигнала, принимаемая радаром, хорошо коррелирует со скоростью приводного ветра и его направлением (*Wentz et al.*, 1984).

В настоящее время только с помощью скаттерометрии возможно получение в глобальном масштабе информации о ветре над акваторией Мирового океана.

2.3.1. Развитие спутниковой скаттерометрии

Развитие спутниковой скаттерометрии условно можно разделить на три этапа (*Seelye*, 2004; *Wilson et al.*, 2009; *Katsaros et al.*, 2011).

Начало. История скаттерометрии началась во время Второй мировой войны. При проведении радиолокации целей над морской поверхностью отраженный сигнал, принимаемый РЛС, оказывался зашумленным. В то время не было известно, чем обусловлено возникновение паразитного сигнала. Впервые связь между наблюдаемым явлением и ветром над океаном была доказана в конце 1960-х гг. (*Фукс*, 1966; *Bass et al.*, 1968a, b; *Басс*, *Фукс*, 1972).

Идея использовать установленный на космическом аппарате прибор, регистрирующий рассеяние радиоволн морской поверхностью, для измерения скорости приводного ветра была предложена в 1966 г. (*Moore, Pierson*, 1966).

Первый этап (с 1974 по 1980 г.) — это спутниковые программы Skylab-IV и SEASAT, связанные с исследованием потенциальной возможности использования спутниковой скаттерометрии.

Первый скаттерометр S-193 RADSCAT (Radar scatterometer) (*Moore et al.*, 1976) был установлен на орбитальной станции Skylab-IV. Он продемонстрировал принципиальную возможность проведения подобных измерений из космоса. Точность определения скорости ветра с помощью этого прибора составляла около 10 % при ее изменениях в диапазоне от 0 до 20 м/с. Важно отметить, что с мая 1973 по февраль 1974 г. несколько раз с помощью скаттерометра RADSCAT исследовалось распределение ветра и волнения в зонах тропических ураганов.

Скаттерометр SASS (SEASAT-A Satellite Scatterometer), установленный на ИСЗ Seasat и функционировавший с июня по октябрь 1978 г., доказал возможность проведения точных измерений скорости ветра из космоса (*Black et al.*, 1985).

Запуском спутника ERS-1 в июле 1991 г., на борту которого был установлен активный микроволновый сенсор AMI (Advanced Microwave Instrument), работающий в режиме скаттерометра и PCA (*Attema et al.*, 1991), начался **второй этап** в развитии спутниковой скаттерометрии — проведение постоянного мониторинга поля приводного ветра.

Скаттерометр NSCAT (NASA Scatterometer), разработанный совместно Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института (Jet Propulsion Laboratory — JPL) и NASA (*Naderi et al.*, 1991), был установлен на борту японского ИСЗ ADEOS-I (Advanced Earth Observing Satellite). С сентября 1996 г. по июнь 1997 г. он передавал непрерывный поток данных измерений скорости и направления ветра над всей поверхностью Мирового океана.

Полученный объем данных по своей полноте, охвату поверхности и точности определения направления и скорости ветра оказался беспрецедентным и был ис-

пользован при решении многих научных и прикладных задач, в частности, для составления прогнозов погоды и оценки сокращения площади влажных тропических лесов.

Результаты, полученные с помощью NSCAT, оказались настолько неожиданными и ценными с точки зрения вклада в понимание атмосферных процессов над морской поверхностью, что после преждевременного схода с орбиты спутника ADEOS-I решено было построить специальный аппарат для замены NSCAT и уменьшения разрыва в наблюдениях.

ИСЗ QuikSCAT (Quick SCATterometer) (Quick Scatterometer..., 1999), выведенный на орбиту в июне 1999 г., был создан в рекордно короткий для США срок — один год и шесть дней с момента формального утверждения программы до поставки готового образца.

Скаттерометр SeaWinds, установленный на борту ИСЗ QuikSCAT, каждые 24 ч передавал данные, собранные с 90 % поверхности Мирового океана. Уникальность этого прибора состоит в первую очередь в том, что впервые вместо нескольких фиксированных антенн с постоянным положением относительно направления движения ИСЗ предыдущих скаттерометров, была реализована концепция конического сканирования двумя узкими лучами.

Аналогичный скаттерометр SeaWinds был установлен на борту ИСЗ ADEOS-II, работавшего на орбите с декабря 2002 по октябрь 2003 г.

В настоящее время продолжает функционировать скаттерометр (Advanced Scatterometer — ASCAT) (Gelsthorpe et al., 2000), установленный на борту европейского метеорологического спутника MetOp-1 (Meteorological Operational), который был выведен на орбиту 10 октября 2006 г. Он представляет собой усовершенствованную модель скаттерометра AMI.

В качестве оценки точности спутниковых измерений скорости ветра используется среднеквадратическая погрешность между значениями, определенными по данным радиолокационных измерений, и измерениями с закоренных буев. В настоящее время точность измерения скорости ветра скаттерометрами не превышает 1,7 м/с, а направления — 17° (Guymet, 1983; Freilich, Dunbar, 1999; Quilfen et al., 2001; Ebuchi et al., 2002; Wilson et al., 2010). Данная точность была достигнута уже в первых алгоритмах, где в качестве единственного предиктора использовалось сечение обратного рассеяния, и для однопараметрических моделей она не улучшена до сих пор (Заневалов, Пустовойтенко, 2004). Полученная точность измерения определяется двумя факторами: техническим, включающим несинхронность измерений, несовпадение местоположения буя с трассой спутника, и физическим, заключающимся в правильности алгоритма расчета скорости ветра по сечению обратного рассеяния.

Основные технические характеристики скаттерометров и точность расчета скорости и направления приводного ветра представлены в табл. 2.9 (см. с. 70).

2.3.2. Физические основы метода

Использование радиолокационных скаттерометров в космической океанологии основано на том, что статистические свойства отраженного радиосигнала, зависят от статистических свойств отражающей поверхности (Басс, Фукс, 1972).

Таблица 2.9. Основные технические характеристики скаттерометров

Датчик	Спутник-носитель	Время активной работы, месяц/год	Рабочая частота, ГГц	Тип сканирования	Угол наклона антенны от направления движения	Диаметр пазона изменения угла падения, град	Полярный зазия	Полоса обзора	Пространственное разрешение	Точность		Покрытие поверхности Земли за 24 ч, %	
										скорость ветра, м/с	направление ветра, град		
SASS	SEASAT	07/1978–10/1978	14,6	Несколь-ко фиксированных антенн	±45 ±135	26–58 26–58	VV, HH VV, HH	500×2	50×50	1,6	17	3–16	–
AMI	ERS-1	07/1991–06/1996	5,25	Несколь-ко фиксированных антенн	45 90 135	28–58 22–48 28–58	VV VV VV	475	50×50	1,5	20	1–14	<41
	ERS-2	04/1995–06/2002											
NSCAT	ADEOS-I	10/1996–08/1997	13,995	Несколь-ко фиксированных антенн	±45 65 –115 ±135	22–60 19–53 19–53 22–60	VV VV, HH VV, HH VV	600×2	25×25	1,3	17	3–30	78
SeaWinds	QuikSCAT	06/1999–11/2009	13,402	Коническое сканирование двумя лучами	40 46	40 46	HH VV	1800	12,5×25	1	20	3–20	90
ASCAT	MetOp-1	10/2006–настоящее время	5,3	Несколь-ко фиксированных антенн	±45 ±90 ±135	37–63 27–52 37–63	VV VV VV	550×2	25×25	2	20	4–24	82

При облучении поверхности океана радиоволнами особенно интенсивно отражаются волны, для которых выполняется так называемое условие брегговского или резонансного рассеяния (Bass et al., 1968a). При наклонном облучении океана резонансное рассеяние наблюдается на морских волнах, длина которых примерно равна половине длины волны зондирующего радиоимпульса.

Модель брегговского рассеяния (более подробно см. п. 2.1.4) описывает связь сечения обратного рассеяния σ^0 с шероховатостью морской поверхности в виде (Bass et al., 1968a)

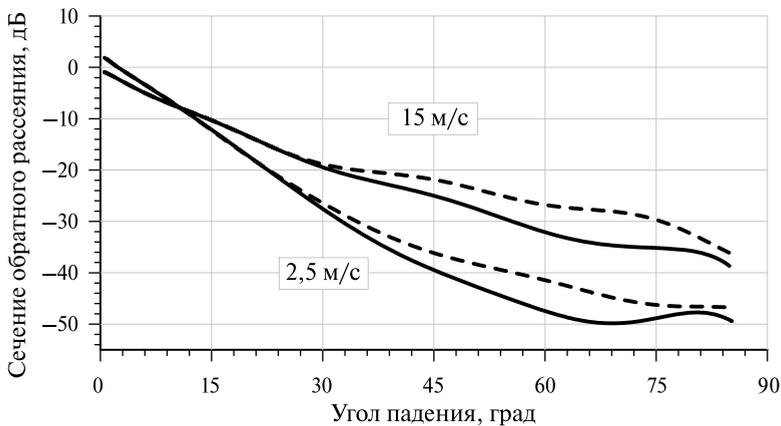
$$\sigma_p^0(K, \theta, \alpha) = 16\pi K^4 \left| G_p^0(\theta) \right|^2 F(k, \varphi), \quad (2.12)$$

где θ — угол падения; φ — азимутальный угол, измеряемый относительно направления полета спутника; G_p — функция угла зондирования, определяемая видом поляризации p зондирующего импульса; F — спектр волновых чисел и направлений возвышения морской поверхности. Условие резонанса, связывающее волновые числа электромагнитных K и поверхностных k волн, имеет вид $k = 2K \sin \theta$.

Для вертикальной и горизонтальной поляризаций функция G_p соответственно имеет вид (Kudryavtsev et al., 2003)

$$\left| G_V \right| = \frac{\cos^4 \theta (1 + \sin^2 \theta)^2}{(\cos \theta + 0,111)^4}, \quad \left| G_H \right| = \frac{\cos^4 \theta}{(0,111 \cos \theta + 1)^4}. \quad (2.13)$$

Зависимость сечения обратного рассеивания от угла падения и азимута. Согласно (2.12), (2.13), сечение обратного рассеивания зависит от угла падения, азимутального угла и поляризации зондирующего сигнала. На рис. 2.19 представлена зависимость сечения обратного рассеивания от угла падения при сканировании морской поверхности в условиях различных скоростей приводного ветра и для разных поляризаций зондирующего сигнала.



Р и с . 2.19. Зависимость сечения обратного рассеивания от угла падения для скоростей приводного ветра 2,5 и 15 м/с. Сплошной линией показана зависимость для HH-поляризации зондирующего сигнала, штриховой линией — для VV-поляризации

Хорошо видно, что при углах падения менее 20° разницы между видами поляризации зондирующего сигнала практически нет. Она наблюдается при углах падения более 30° . Поэтому для скаттерометров используются зондирующие радиопульсы с углами падения в диапазоне $30\text{--}60^\circ$. Это обстоятельство позволяет охватывать довольно широкую полосу на поверхности Мирового океана, соизмеримую с высотой орбиты ИСЗ или даже большей (см. табл. 2.9).

В п. 2.1.4 показано, что взволнованная морская поверхность квалифицируется как композитная модель или «рябь на крупной волне». Механизм брегговского рассеяния учитывает влияние ряби, а влияние крупномасштабной компоненты может быть учтено пространственной модуляцией рассеянных сигналов. Неровности морской поверхности являются анизотропными — гребни и впадины поверхности волн расположены перпендикулярно направлению ветра, что позволяет определить кроме скорости ветра также его направление. Это продемонстрировано на рис. 2.20, который является иллюстрацией простой эмпирической модели зависимости сечения обратного рассеяния от азимута и поляризации зондирующего сигнала, построенной по экспериментальным данным:

$$\sigma^\circ = A + B \cos \varphi + C \cos 2\varphi, \quad (2.14)$$

где A , B и C — постоянные, которые зависят от частоты зондирующего импульса, его поляризации, угла падения и скорости ветра.

Модель (2.14) позволяет рассчитать коэффициенты A , B и C для нескольких измерений скаттерометра в фиксированных направлениях сканирования (рис. 2.21, см. с. 73). Точка пересечения всех кривых соответствует измеряемой скорости

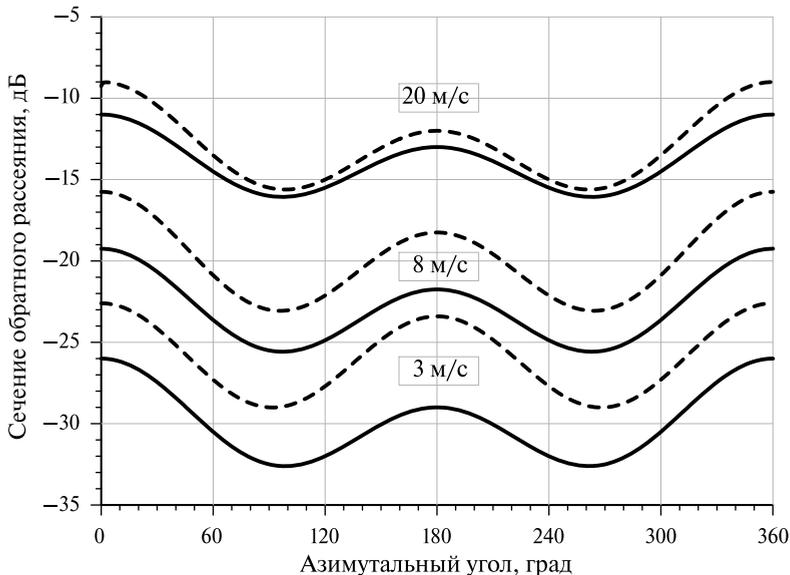


Рис. 2.20. Зависимость сечения обратного рассеяния от азимутального угла для скоростей приводного ветра 3, 8 и 15 м/с, направленного против движения спутника, для угла падения 47° . Сплошной линией показана зависимость для HH-поляризации зондирующего сигнала, штриховой линией — для VV-поляризации

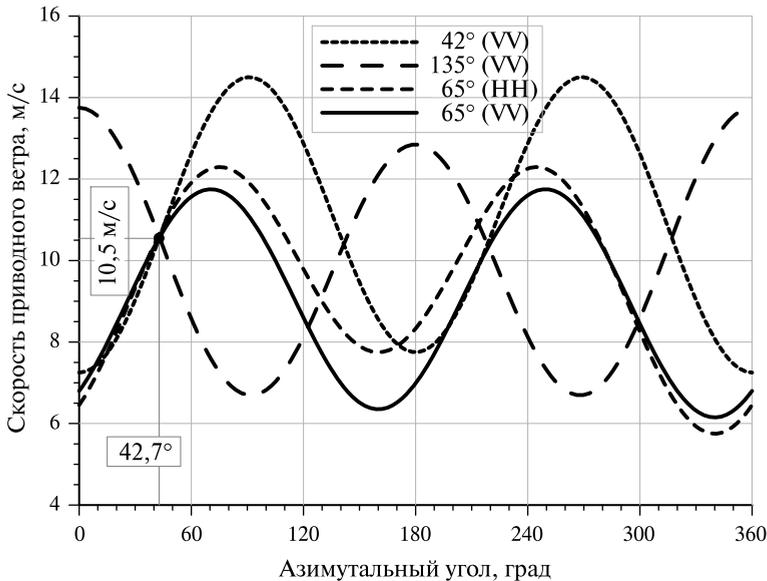


Рис. 2.21. Определение скорости приводного ветра на основе четырех измерений скаттерометра на трех антеннах, направленных под соответствующими углами к направлению движения спутника, и различных поляризациях. Точка пересечения всех кривых соответствует скорости ветра $V = 10,5$ м/с и его направлению $\varphi = 42,7^\circ$

($V = 10,5$ м/с) и направлению ($\varphi = 42,7^\circ$) приводного ветра. Следует отметить, что на рис. 2.21 различима еще одна точка, которая близка к тому, чтобы назваться пересечением всех трех кривых, — $V = 10,4$ м/с и $\varphi = 216,5^\circ$. Таким образом, если измерения будут содержать шумы, то возможно неправильное определение скорости и направления ветра. При наличии дождя рассеяние от падающих капель или от неровностей на поверхности океана, вызванных дождем, будет сильно влиять на результат измерений.

Учет доплеровского смещения. Для скаттерометров с веерной диаграммой направленности антенны, вследствие быстрого перемещения спутника по орбите, принимаемый рассеянный сигнал относительно рабочей частоты скаттерометра f будет иметь определенное доплеровское смещение по частоте $\delta f = \frac{2fv}{c} \sin(\theta')$, зависящее от скорости движения (v) и угла падения зондирующего радиоимпульса по отношению к направлению полета (θ').

Этой проблемы легко избежать, если осуществлять сканирование короткими импульсами и анализировать временную задержку (Δt) отраженного импульса, которая не зависит от скорости движения спутника, а только от угла падения: $\Delta t = 2h/(c \cos \theta)$.

2.3.3. Геометрия обзора

На сегодняшний день существуют два метода проведения скаттерометрических измерений подстилающей поверхности с борта ИСЗ.

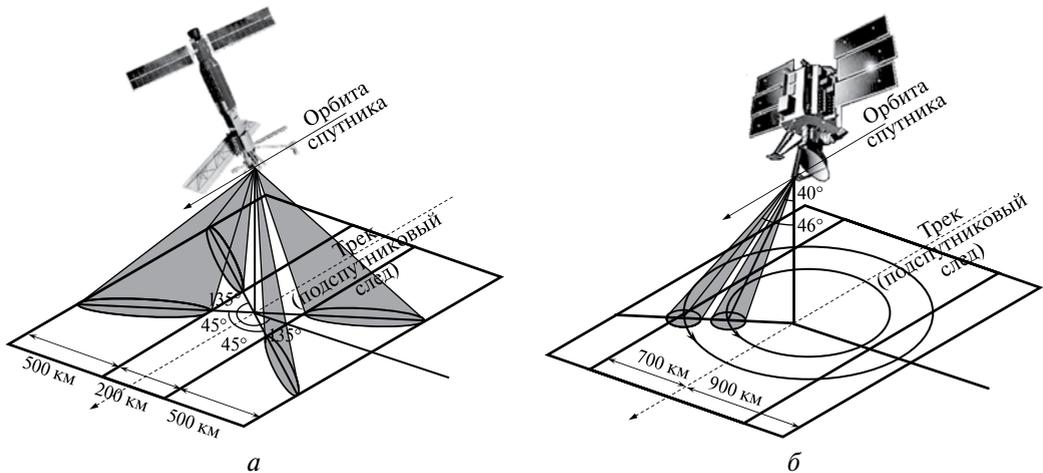


Рис. 2.22. Геометрия обзора: *а* — скаттерометра SASS с фиксированными угловыми положениями антенн относительно направления движения спутника SEASAT; *б* — скаттерометра SeaWinds спутников QuikSCAT и ADEOS-II, осуществляющего коническое сканирование двумя узкими лучами

Первый метод был реализован при конструировании скаттерометра SASS спутника SEASAT. Конструктивно скаттерометр представляет собой несколько фиксированных антенн с постоянным угловым положением 45° и 135° относительно направления движения (рис. 2.22*а*). С целью достижения высокого пространственного разрешения используется метод коротких импульсов. При этом из импульсов VV- или HH-поляризации формируются четыре расходящихся пучка по два с каждой стороны спутника. Разница азимутов пучков 45° и 135° позволяет определить направление ветра над поверхностью океана. Геометрия расходящихся пучков представлена на рис. 2.22*а*. Пучки расходятся таким образом, что пересекают поверхность Земли по двум полосам с шириной 500 км и протяженностью от 150 до 650 км вдоль траектории спутника. Угол падения всех пучков находится в диапазоне от 21° до 62° .

В связи с тем, что на малых углах падения зондирующего импульса (см. п. 2.3.2) разница сечения обратного рассеивания на VV- и HH-поляризации незначительна, скаттерометрические измерения в полосе 200 км справа и слева от траектории движения спутника (см. рис. 2.22) не производятся, т.е. возникает слепая область. Таким же недостатком обладают и все остальные скаттерометры подобной конструкции (рис. 2.23, см. с. 75).

Короткие импульсы поступают поочередно на четыре антенны SASS. Анализ временных характеристик отраженных импульсов дает пространственное разрешение порядка 50 км. Так как любая точка поверхности Земли попадает в одну из полос облучения число раз, кратное числу антенн, с учетом изменения поляризации зондирующего импульса это число увеличивается. Рассеянные этой точкой импульсы образуют ряд значений σ° , что позволяет рассчитать коэффициенты уравнения (2.14) с высокой точностью.

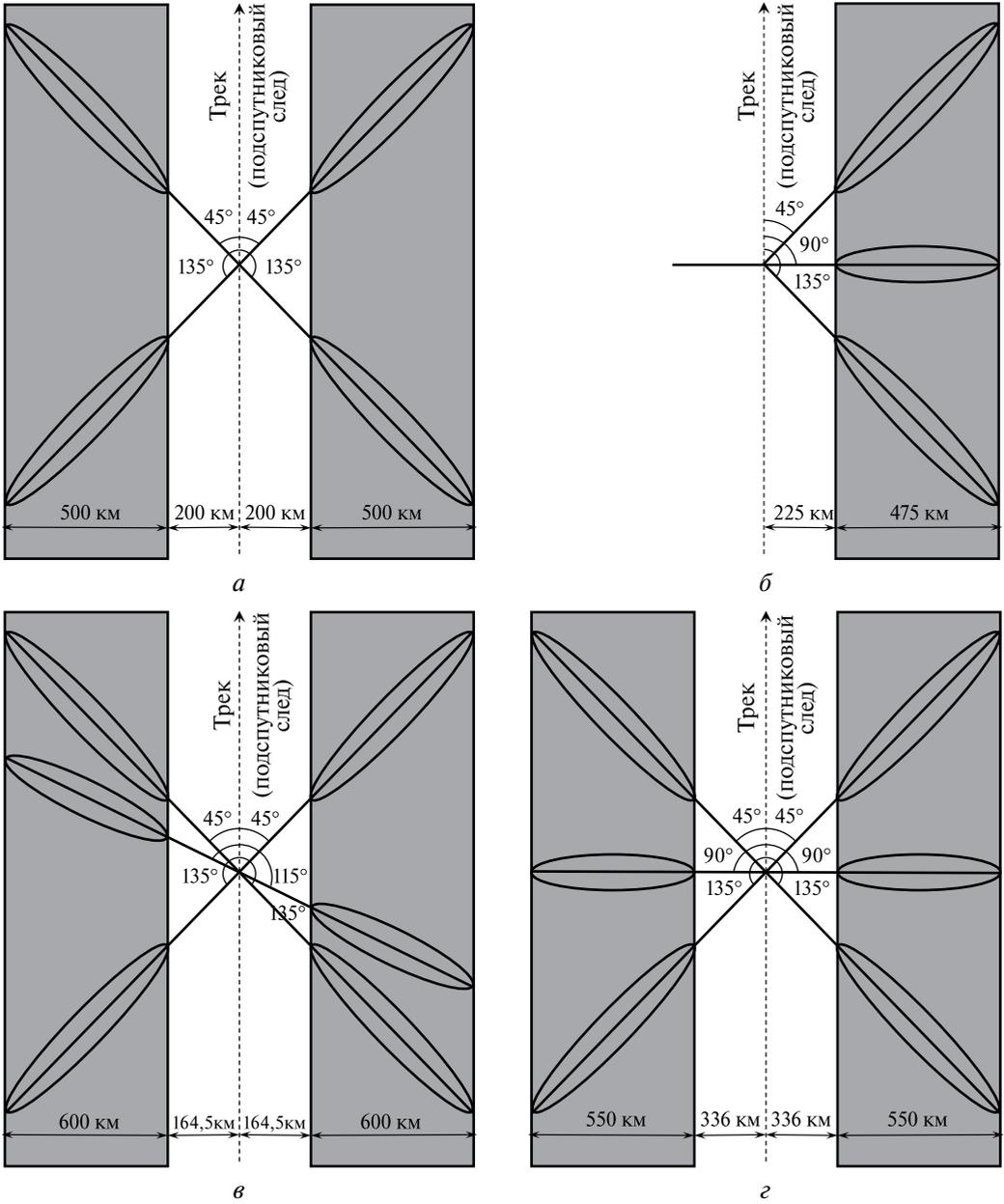


Рис. 2.23. Геометрия измерений скаттерометров: *a* — SASS; *б* — AMI; *в* — NSCAT; *г* — ASCAT с фиксированными углавыми положениями антенн относительно направления движения спутника

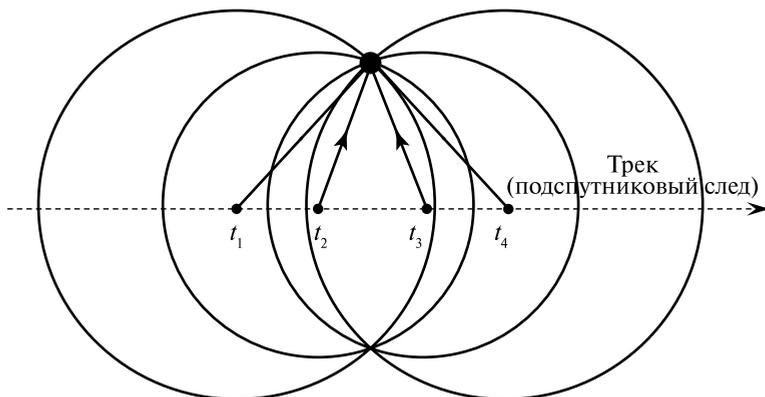


Рис. 2.24. Пример облучения точки на поверхности Земли скаттерометром SeaWinds спутников QuikSCAT и ADEOS-II, осуществляющего коническое сканирование двумя узкими лучами

По охвату территории лидерами на сегодняшний день являются скаттерометры SeaWinds с узкой диаграммой направленности антенны, установленные на борту ИСЗ QuikSCAT и ADEOS-II (см. рис. 2.22б). Уникальность этого прибора в первую очередь в том, что впервые была реализована концепция конического сканирования двумя узкими лучами под углами падения 40° и 46° (или с учетом кривизны Земли 47° и 55°). При организации такой концепции измерений исчезает «слепая» полоса под спутниками. Отсутствует и такое понятие как протяженность полосы обзора. В полосе обзора шириной 1400 км любая точка поверхности Земли попадает четыре раза в полосу облучения первого и второго сканирующего луча (рис. 2.24), а в полосах шириной 200 км, расположенных на расстоянии 700 км слева и справа от направления движения спутника — два раза. При наличии возможности изменения поляризации зондирующих импульсов это число увеличивается.

Следующим этапом развития спутниковой скаттерометрии должен стать радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны (Караев и др., 2004, 2010). За счет применения ножевой антенны удастся видеть точку на поверхности под 6–10 азимутальными углами. При высоте полета 800 км полоса обзора составит около 1400 км с разрешением 14×14 км.

2.3.4. Применение спутниковой скаттерометрии

Помимо своего прямого назначения — измерения скорости и направления приводного ветра — спутниковая скаттерометрия позволяет определять границы ледяного покрова морей, а также исследовать его толщину. Скаттерометры при этом демонстрируют более высокое пространственное разрешение, чем технология микроволновой радиометрии (Grandell et al., 1993; Sharp, Wang, 2009; Irving et al., 2010).

Микроволновая скаттерометрия широко применяется для определения основных параметров почвы: влажности, неровностей и состава (Bartalis et al., 2007; Naeimi et al., 2009). Однако следует отметить, что скаттерометры применяются для иссле-

дования только обширных площадей почвы. Обычно почвенный покров изучается с помощью систем РСА.

Микроволновые скаттерометры используются также для изучения растительного покрова, в частности, тропических лесов (*Long, Skouson, 1996; Froking et al., 2011*). При таких исследованиях возникают некоторые теоретические трудности, так как обратное рассеянное излучение скаттерометр фиксирует не только от растительности, но и от земли.

Данные скаттерометрии в графическом виде можно найти на сайте STAR (Satellite Applications and Research) <http://manati.orbit.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATData.php>. В численном виде данные спутников SEASAT, QuikSCAT, ADEOS-I/II и на регулярных сетках расположены на сайте PODAAC http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/ow.html.

Более подробно ознакомиться с методом спутниковой скаттерометрии можно в работах (*Rees, 2001; Remote sensing..., 2003; Seelye, 2004; Robinso, 2004; Cracknell, Hayes; 2007; Elachi, van Zyl, 2006*).

2.4. СПУТНИКОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОКЕАНА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

В дистанционных методах исследований оптическим считается диапазон длин волн в пределах от 0,1 мкм до 1000 мкм. На рис. 2.25 представлен оптический диапазон электромагнитных волн, включающий в себя ультрафиолетовый (УФ) участок спектра, видимый участок — синяя полоса (В), зеленая (G), красная (R) и инфракрасный (ИК), включающий в себя ближний ИК, средний ИК и дальний ИК.



Рис. 2.25. Оптический диапазон электромагнитных волн

2.4.1. Исследования океана из космоса в видимом диапазоне спектра

Видимое излучение — это электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом, которые занимают участок спектра с длиной волны приблизительно от 0,38 мкм (фиолетовый) до 0,78 мкм (красный).

Дистанционное зондирование в видимом диапазоне основано на наблюдении яркости рассеянного и отраженного океаном солнечного света. Падающее солнечное излучение частично отражается водной поверхностью, верхним слоем моря, взвешенными в нем частицами и морским дном. Отражательные свойства морской поверхности определяются набором нескольких оптических характеристик, включая спектральный и интегральный коэффициенты яркости, спектральное и интегральное альbedo и контраст.

Яркость оптического излучения моря является суммой яркостей солнечного света, отраженного от морской поверхности (B_s), от подповерхностного слоя (B_u) и от морского дна (B_b):

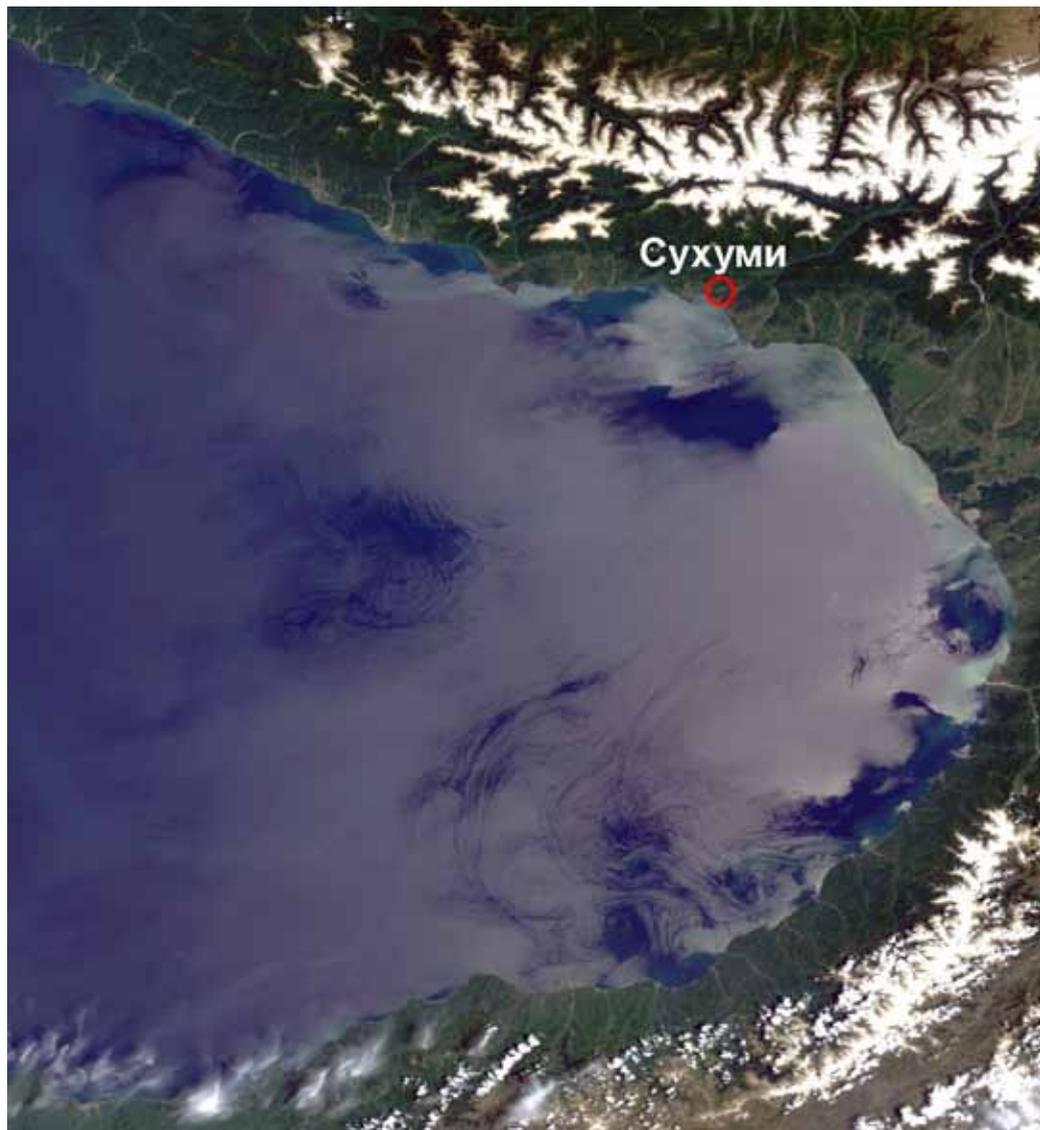
$$B = B_s + B_u + B_b.$$

Все составляющие яркости оптического излучения существенным образом зависят от условий освещенности.

Коэффициент яркости солнечного излучения, отраженного от морской поверхности (B_s), зависит от освещенности, направления наблюдения и состояния поверхности моря. Отраженное излучение формируется под влиянием прямой и рассеянной солнечной радиации. Отраженный прямой солнечный свет, называемый бликом, распространяется под тем же углом к нормали, что и падающее излучение. Яркость излучения участка морской поверхности равна яркости падающего излучения, умноженного на коэффициент отражения, и во много раз превосходит яркость излучения моря вне зоны блика. Яркость элемента поверхности, не бликующего в направлении наблюдения, определяется отражением от поверхности солнечного излучения, рассеянного атмосферой и облачностью (излучение неба). При отражении прямого солнечного излучения невозмущенной (зеркальной) морской поверхностью имеется одно бликующее направление. Наличие неоднородностей шероховатости — поверхностного волнения — приводит к возникновению семейства бликующих направлений и обуславливает целый ряд особенностей интерпретации спутниковых изображений. В зоне солнечного блика менее шероховатый участок будет иметь большую яркость в силу наличия большего числа локальных элементов, отражающих прямое солнечное излучение. Вне солнечного блика наблюдается обратная картина — участкам пониженной шероховатости соответствует меньшая яркость в силу наличия меньшего числа локальных наклонных площадок, отражающих солнечное излучение (Мироненко, Станичный, 1999). Следует также отметить, что наличие на морской поверхности пленочных загрязнений (нефтяные пленки или пленки ПАВ) может оказывать существенное влияние на интенсивность отраженного поверхностью оптического излучения. На рис. 2.26 (см. с. 79) представлен фрагмент цветосинтезированного изображения, полученного при помощи спектрорадиометра MERIS спутника Envisat в зоне солнечного блика в восточной части Черного моря. На изображении хорошо видны пленки поверхностно-активных веществ естественного происхождения, вовлеченные в орбитальные движения вихревых образований и скопившиеся в зонах конвергенции.

Яркость излучения, отраженного морским дном (B_b), определяется условиями освещения, глубиной и прозрачностью воды, отражательной способностью грунта.

Интенсивность излучения подповерхностного слоя моря (B_u) находится в прямой зависимости от интенсивности проникающего в воду солнечного света, являющейся функцией высоты солнца над горизонтом. Глубина, с которой поступает рассеянное в толще моря излучение, определяется величиной коэффициента вертикального ослабления оптического излучения. Голубой цвет глубоких прозрачных вод возникает в результате сильного рассеяния в коротковолновой части светового потока молекулами воды. Так как вода содержит органические и неорганические примеси, происходят дополнительные побочные оптические процессы — на оптические свойства морской воды сильно влияют взвешенные частицы.



Р и с . 2.26. Фрагмент цветосинтезированного изображения MERIS Envisat (каналы 7-й, 5-й и 2-й), полученного 27 мая 2010 г. в восточной части Черного моря в зоне солнечного блика. Пространственное разрешение 260 м

Примеси, оказывающие влияние на восходящий поток излучения, можно объединить в три основные группы (*Кронберг*, 1988):

- Окрашенное органическое вещество («желтое вещество») — главный фактор, определяющий поглощение света морской водой в коротковолновой части спектра. В эту группу входят все растворенные в воде органические соединения, которые сильно поглощают ультрафиолетовые и голубые лучи, в связи

с чем вода приобретает желто-бурый цвет. *Показатель поглощения желтого вещества* используется как характеристика содержания окрашенной органики в морской воде; это одна из основных характеристик качества воды в прибрежной зоне.

- Взвешенное вещество, под которым понимают все частицы, присутствующие в воде. В эту группу входят глинистые минералы, песок, зерна и обломки кварца и других минералов, скелеты планктона и других организмов. Они обуславливают очень сильное рассеяние света в воде, которое слабо зависит от длины волны излучения. *Показатель рассеяния назад взвешенными частицами* достаточно надежно рассчитывается по данным спутниковых сканеров цвета. Он характеризует содержание взвеси в воде, определяет альбедо водной толщи и является удобным параметром мониторинга.
- Особую группу примесей образует фитопланктон, который благодаря хлорофиллу дает сильные полосы поглощения в голубой (0,44 мкм) и красной (0,675 мкм) частях спектра излучения. *Концентрация хлорофилла* — единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов (*Doerffer, Fiseher, 1994*). Это важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продукции океанов и морей.

Из сказанного выше следует, что сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отраженным от поверхности солнечным излучением (наиболее сильно проявляющимся в зоне солнечного блика). Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Коэффициент яркости в выбранном спектральном диапазоне спутникового сканера или набор спектральных коэффициентов яркости может непосредственно использоваться для исследования пространственно-временной изменчивости поверхностного слоя, в частности, мезомасштабной динамики вод. Таким образом, анализ снимков позволяет выделить основные мезомасштабные структуры, определяющие поле течений в изучаемом районе.

Необходимо помнить, что сенсоры, работающие в видимом диапазоне, регистрируют солнечное излучение, отраженное от подстилающей поверхности и прошедшее через атмосферу. «Истинный» цвет океана обусловлен спектральным составом излучения, выходящего из водной толщи, и определяется оптическими свойствами морской воды, тогда как цвет, «видимый» спутниковым датчиком, обусловлен в значительной степени влиянием атмосферы. Чтобы выделить излучение, выходящее из водной толщи, проводится атмосферная коррекция, исходной информацией для которой являются спектральные значения яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренные спутниковыми сенсорами. Вычислению характеристик восходящего излучения морской поверхности посвящено большое количество исследований, в которых использованы различные методы учета влияния атмосферы (Дистанционное..., 1987, *Копелевич* и др., 2006).

В табл. 2.10 (см. с. 81) приведены основные характеристики океана и атмосферы, рассчитываемые по данным спутниковых сканеров цвета.

Таблица 2.10. Основные характеристики океана и атмосферы, рассчитываемые по данным спутниковых сканеров цвета

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости водной толщи	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя; позволяет наблюдать динамические процессы в поверхностном слое, в частности, распространение речных стоков, примесей различного происхождения, мезомасштабные вихри, фронтальные зоны и т. п.
Концентрация хлорофилла	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для расчета первичной продукции океанов и морей
Характеристики атмосферного аэрозоля	Характеризует содержание аэрозоля в атмосфере, непосредственно влияющего на пропускание солнечной и уходящей радиации, на микрофизику облаков
Параметры облаков	Важнейший метеорологический фактор
Спектральная облученность поверхности	Важный фактор, определяющий первичную продукцию и тепловой баланс океана
Показатель вертикального ослабления подводной облученности	Ключевая характеристика для расчета светового режима в водной толще, альбедо океана и объемного поглощения солнечной энергии в поверхностном слое
Первичная продукция	Один из основных параметров, характеризующий биоресурсы океана и определяющий глобальные потоки углерода в системе атмосфера-океан
Показатель поглощения окрашенного органического вещества	Определяет поглощение света в воде, характеризует содержание окрашенной органики и качество воды в прибрежной зоне, один из параметров мониторинга
Показатель рассеяния морской взвеси	Определяет альбедо водной толщи, характеризует содержание взвеси в воде, один из параметров мониторинга

2.4.2. Исследования океана из космоса в инфракрасном диапазоне спектра

Инфракрасное излучение также называют «тепловым» излучением, так как оно воспринимается кожей человека как ощущение тепла. При этом длина волны, излучаемая нагретым телом, зависит от температуры нагревания: чем выше температура, тем короче длина волны и выше интенсивность излучения.

В тепловом инфракрасном диапазоне спектра имеется два «окна прозрачности» атмосферы — в интервалах длин волн 3–5 и 8–13 мкм, где можно проводить космические исследования Мирового океана. В первом из этих «окон» собственное тепловое излучение океана соизмеримо по интенсивности с отраженным солнечным, поэтому измерения температуры океана должны производиться только на теневой стороне орбиты, т.е. на стороне Земли, не освещенной солнцем. Во втором «окне» отраженная солнечная радиация практически отсутствует, и тепловые измерения не зависят от условий освещенности поверхности Земли Солнцем. Прозрачность атмосферы в этих «окнах» довольно высока, но при точных температурных измерениях

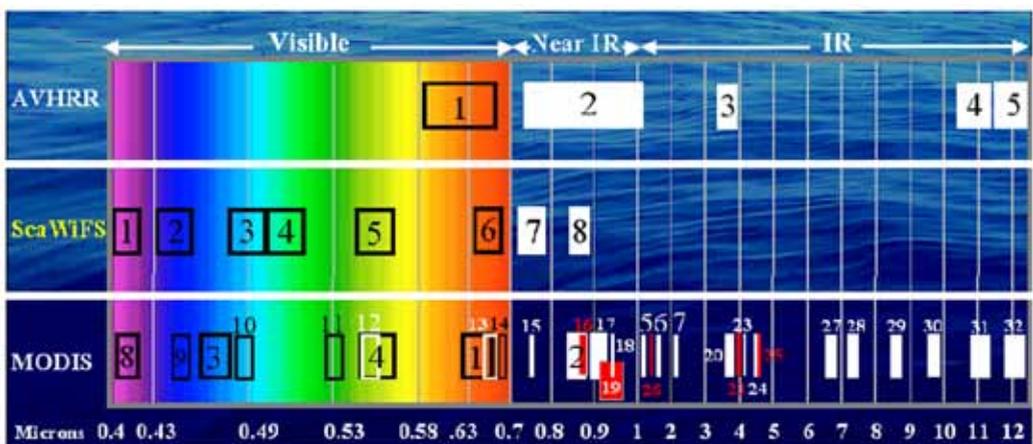
требуется учитывать и поглощение излучения земной атмосферой. Для точного определения передаточной функции атмосферы необходимо знать вертикальные профили (распределение с высотой) температуры и влажности воздуха, а также вертикальное распределение и оптические характеристики аэрозоля (облачности). Точная оценка этих величин возможна только с привлечением дополнительных данных зондирования атмосферы в видимом, ближнем инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра. Для приближенных расчетов температуры подстилающей поверхности можно обойтись и простыми оценками атмосферных помех.

Набор гидрофизических параметров, определяемых при зондировании Мирового океана из космоса в этой области спектра, весьма ограничен, но зато среди них находится параметр, представляющий большое практическое значение, — температура поверхности океана, которая с учетом известных методов восстановления ТПО по измерениям AVHRR соответствует температуре поверхностного слоя океана (см. Федоров, Гинзбург, 1988; Ginzburg et al., 2008a).

Точное знание о распределении этой температуры позволяет определять границы океанских течений, положение фронтальных зон, следить за перемещениями океанических мезомасштабных вихрей, находить районы повышенной биопродуктивности, оценивать взаимодействие океана и атмосферы, решать ряд других важных задач.

Информацию о температуре поверхностного слоя океана несет инфракрасное тепловое излучение его поверхности, интенсивность которого связана с обычной (термодинамической) температурой известным законом Стефана—Больцмана. Поскольку эту интенсивность можно измерить с помощью установленной на борту ИСЗ аппаратуры, то, следовательно, таким образом может определяться и температура океана.

Температура поверхности океана — один из первых океанографических параметров, который начал измеряться с борта искусственных спутников Земли. Она рассчитывается по данным о радиояркостной температуре, измеряемой инфракрасными и сверхвысокочастотными радиометрами (включая радиометры, сканирующие вдоль



Р и с . 2.27. Спектральные диапазоны радиометров AVHRR (NOAA), SeaWiFS (Orbview-2) и MODIS (Terra и Aqua)

подспутникового следа), и по данным сканеров видимого диапазона, которые имеют дополнительный канал в ИК-диапазоне.

Мониторинг ТПО осуществляется с помощью радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer — усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), установленных на нескольких спутниках серии NOAA-KLM, имеющих пять спектральных каналов (рис. 2.27, см. с. 82), обладающих пространственным разрешением 1,1 км и разрешением по температуре 0,1 °С. Радиометры используются для широкого диапазона задач по мониторингу состояния окружающей среды, включая: анализ и прогноз погоды; изучение поля температуры поверхности океанов и морей, а также температуры и влажности атмосферы; мониторинг динамики вод океана, извержений вулканов, лесных пожаров, пылевых бурь, интенсивности вегетации и др. Дважды в день каждый спутник покрывает любую точку на поверхности земного шара. Для мониторинга ТПО также используются спектрометрические MODIS, установленные на спутниках Terra и Aqua, и спутник MetOp-2 Европейского космического агентства.

Основной проблемой при восстановлении полей ТПО на основе спутниковых данных является облачность, поэтому для районов, практически постоянно закрытых облачностью, используются СВЧ-радиометры, которые обладают существенно худшим разрешением по пространству — 25 км и температуре — 0,8 °С. Точность расчета температуры поверхности океана для различных типов радиометров представлена в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Точность измерения температуры поверхности океана с борта ИСЗ различными радиометрами

Тип	Датчик		Точность, °С
	Название (полное и сокращенное)		
ИК-радиометр	Advanced Very High Resolution Radiometers	AVHRR	0,3–0,5
Спектрометрический	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer	MODIS	0,3
ИК-радиометр	Along-Track Scanning Radiometer	ATSR	0,3
СВЧ-радиометр	Special Sensor Microwave Imager	SSM/I	0,7–0,8

2.4.3. Приборы, обеспечивающие наблюдения Земли в видимом и ИК-диапазонах

В настоящее время функционирует достаточно большое число спутников дистанционного зондирования, на которых установлены приборы, обеспечивающие наблюдения Земли в оптическом и ИК-диапазонах. Число таких функционирующих спутников и приборов постоянно меняется. Существует также достаточно много информационных ресурсов, которые хранят, актуализируют и представляют информацию о разных приборах и спутниках наблюдения Земли. Сегодня, по мнению авторов, наиболее полными и удобными в работе являются следующие ресурсы:

- <http://www.es.ucsc.edu/~hyperwww/instruments.html> — поддерживается департаментом науки о Земле и планетах Университета Калифорнии Санта Круз.
- <http://www.sovzond.ru/satellites/> — поддерживается компанией Совзонд.

- Описание российских спутниковых систем можно также найти на сервере Научного центра мониторинга Земли: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites.

В данном разделе дается лишь краткое описание спутниковых систем (приборов), которые, по мнению авторов, наиболее часто и эффективно используются для решения задач мониторинга и исследования морей и внутренних водоемов. В табл. 2.12 (см. с. 85–90) также указаны некоторые задачи, связанные с изучением этих природных объектов, для которых обычно используются описываемые приборы.

В настоящее время сканерами цвета моря, наиболее широко используемыми во всем мире, являются два американских, принадлежащих NASA, сканера MODIS — Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer на спутниках Terra и Aqua, сканер MERIS, установленный на спутнике Envisat Европейского космического агентства, и коммерческий (американской компании GeoEye) SeaWiFS — Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor на спутнике SeaStar. На рис. 2.27 приведены спектральные диапазоны этих сенсоров.

Из перечисленных в табл. 2.12 сенсоров оптического диапазона наиболее широкое распространение получили **данные сканеров MODIS**. Многофункциональные 36-канальные сканеры MODIS позволяют получать информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м в надире, а также тепловые изображения в ИК-диапазоне с разрешением 1000 м. Полоса обзора шириной 2330 км позволяет сканеру видеть любую точку на Земле с периодичностью 1–2 дня. Комбинация данных о поле температуры, цвете моря и других оптических свойствах морской поверхности, получаемых с радиометров MODIS, позволяет получать информацию о распределении взвеси, цветении вод, ТПМ, а также о полях течений с высоким разрешением путем анимации последовательности спутниковых изображений. Учитывая, что пролеты спутников, например, над Балтикой разнесены на ~2–4 ч, использование данных последовательных пролетов позволяет восстанавливать поля течений по последовательности спутниковых изображений.

Снимки MODIS бесплатно доступны через две Интернет-системы, поддерживаемые NASA — Ocean Colour Web (OC) [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>] и LAADS [<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/index.html>]. Распространяемые ими данные во многом различны.

Ocean Colour Web — специализированный научный информационный ресурс по спутниковым данным цвета океана. Здесь доступны для скачивания данные разных уровней обработки (от L0 до L3, зависит от спутника) со всех спутниковых сканеров цвета моря: CZCS, OCTS (архивные), MODIS Terra/Aqua (архивные и новые), SeaWiFS (старше 5 лет, нужно регистрироваться).

Описание файлов разного уровня обработки приведено на соответствующей веб-странице [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/ocformats.html#1>]. Кроме того, на сайте представлена всесторонняя информационно-сервисная поддержка пользователей по структуре, видам, форматам данных, научным основам, алгоритмам и программам обработки снимков.

LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System) — система распространения данных о суше и атмосфере. Доступны данные MODIS Terra/Aqua, уровней обработки от L0 до L3 [<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/filespecs.html>]. Располагает удобным интерфейсом для массового поиска снимков и лучшей схемой организации скачивания больших объемов данных, чем Ocean Colour Web.

Таблица 2.12. Основные технические характеристики спутниковых сенсоров оптического диапазона

Основные технические характеристики		Область применения в целях исследования океана
AVHRR (NOAA)		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 833 км	<ul style="list-style-type: none"> • Построение карт температур водной поверхности; • оценка ледовой обстановки; • обнаружение крупных сбросов загрязняющих веществ в водоёмы; • обнаружение и оценка масштабов катастрофических наводнений; • восстановление вертикального профиля температуры и влажности атмосферного воздуха; • оперативный прогноз участков сильного циклогенеза; • визуальное отображение состояния погоды и составление синоптических карт; • оперативное отслеживание зон затоплений в период весеннего половодья и паводка
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон, мкм	
1	0,580—0,680	
2	0,725—1,000	
3А	1,580—1,640	
3В	3,550—3,930	
4	10,300—11,300	
5	11,500—12,500	
Пространственное разрешение:	1,09 км	
Ширина полосы съемки:	2800 км	
Периодичность съемки:	4 раза в сутки	
SeaWiFS (SeaStar)		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 705 км	<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • определение концентрации хлорофилла-<i>a</i>; • анализ концентрации фитопланктона различного видового состава; • мониторинг экологического состояния водных объектов; • наблюдения за цветением токсичных видов фитопланктона; • мониторинг «красных приливов»; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • определение концентрации взвешенных в приповерхностной водной толще веществ
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон, мкм	
1	0,402—0,422	
2	0,433—0,453	
3	0,480—0,500	
4	0,500—0,520	
5	0,545—0,565	
6	0,660—0,680	
7	0,745—0,785	
8	0,845—0,885	
Пространственное разрешение:	1,1 км	
Ширина полосы съемки:	2801 км	
Периодичность съемки:	1 раз в сутки	

Основные технические характеристики		Область применения в целях исследования океана
MODIS Terra/Aqua		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 705 км	
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон, мкм	
1–2	0,620–0,670; 0,841–0,876	• Изучение облачного покрова, концентрации взвешенных частиц (аэрозолей), распределения водяного пара в атмосфере, мониторинг опасных атмосферных явлений;
3–7	0,459–0,479; 0,545–0,565; 1,23–1,25; 1,628–1,652; 2,105–2,155	• оперативное картографирование и изучение температурного режима океана;
8–19	0,405–0,42; 0,438–0,448; 0,483–0,493; 0,526–0,536; 0,546–0,556; 0,662–0,672; 0,673–0,683; 0,743–0,753; 0,862–0,877; 0,890–0,920; 0,931–0,941; 0,915–0,965	• определение оптических характеристик поверхностных вод;
20–25	3,660–3,840; 3,929–3,989; 3,929–3,989; 4,020–4,080; 4,433–4,498; 4,482–4,549	• определение концентрации хлорофилла- <i>a</i> ;
26	1,360–1,390	• анализ распространения и динамики распределение фитопланктона в целях определения биопродуктивности океана;
27–36	6,535–6,895; 7,175–7,475; 8,400–8,700; 9,580–9,880; 10,780–11,280; 11,770–12,270; 13,185–13,485; 13,485–13,785; 13,785–14,085; 14,085–14,385	• мониторинг экологического состояния водных объектов;
Пространственное разрешение:	250 м (1–2-й каналы) 500 м (3–7-й каналы) 1000 м (8–36-й каналы)	• наблюдения за цветением токсичных видов фитопланктона;
Ширина полосы съемки:	2300 км	• мониторинг «красных приливов»;
Периодичность съемки:	2 раза в день	• мониторинг паводков;
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 799,8 км	• мониторинг природных и антропогенно-спровоцированных катастроф на региональном и глобальном уровнях (наводнения, цунами, извержения вулканов, пожары, катастрофические разливы нефти и т. п.);
		• наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности;
		• наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов;
		• определение концентрации взвешенных в приповерхностной водной толще веществ
		MERIS (Envisat)

Продолжение табл. 2.12

Основные технические характеристики		Область применения в целях исследования океана
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон, мкм	<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • определение концентрации хлорофилла-<i>a</i>; • анализ концентрации фитопланктона различного видового состава; • мониторинг экологического состояния водных объектов; • наблюдения за цветением токсичных видов фитопланктона; • мониторинг «красных приливов»; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • наблюдения за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • определение концентрации взвешенных в приповерхностной водной толще веществ; • определение концентрации аэрозолей и поглощения радиации атмосферными газами; • определение доли фотосинтетически активной радиации
1	0,407–0,417	
2	0,437–0,447	
3	0,485–0,495	
4	0,505–0,515	
5	0,555–0,565	
6	0,615–0,625	
7	0,660–0,670	
8	0,677–0,685	
9	0,703–0,713	
10	0,750–0,757	
11	0,7677–0,685	
12	0,771–0,786	
13	0,855–0,675	
14	0,880–0,890	
15	0,895–0,905	
Пространственное разрешение:	300 и 1200 м	
Ширина полосы съемки:	1150 км	
Периодичность съемки:	3 дня	
TM (Landsat-5)		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 705 км	<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • анализ биопродуктивности фитопланктона; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • наблюдения за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • оценка концентрации взвешенных веществ
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон (мкм)	
1	0,450–0,515	
2	0,525–0,605	
3	0,630–0,690	
4	0,750–0,900	
5	1,550–1,750	
6	10,400–12,500	
7	2,085–2,350	

Основные технические характеристики		Область применения в целях исследования океана	
Пространственное разрешение:	30 м (1–5-й, 7-й каналы) 120 м (6-й канал)		
Ширина полосы охвата:	185 км		
Периодичность съемки:	16 дней		
ETM+ (Landsat-7)			
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 705 км	<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • анализ биопродуктивности фитопланктона; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • оценка концентрации взвешенных веществ 	
Режимы/Каналы:	Спектральный диапазон, мкм		
1	0,450–0,515		
2	0,525–0,605		
3	0,630–0,690		
4	0,750–0,900		
5	1,550–1,750		
6	10,400–12,500		
7	2,085–2,350		
8	0,520–0,900		
Пространственное разрешение:	30 м (1–5-й; 7-й каналы) 60 м (6-й канал) 15 м (8-й канал)		
Ширина полосы охвата:	185 км		
Периодичность съемки:	16 дней		
HRV, HRVIR (SPOT-2, -4)			
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 822 км	<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • анализ биопродуктивности фитопланктона; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • оценка концентрации взвешенных веществ 	
Режимы:	Спектральный диапазон, мкм		
Панхроматический	0,500–0,730 (SPOT-2) 0,610–0,680 (SPOT-4)		

Основные технические характеристики		Область применения в целях исследования океана
Мультиспектральный	зеленый: 0,500–0,590 красный: 0,610–0,680 ближний ИК: 0,780–0,890 средний ИК: 1,580–1,750 (только для SPOT-4)	
Пространственное разрешение:	10 м (панхроматический режим) 20 м (мультиспектральный режим)	
Ширина полосы съемки:	60 км (в надире)	
Периодичность съемки	26 дней (при съемке в надире)	
Vegetation (SPOT-4)		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 822 км	• Определение оптических характеристик поверхностных вод;
Режимы:	Спектральный диапазон, мкм	• анализ биопродуктивности фитопланктона;
Vegetation 1	0,450–0,520; 0,610–0,680 0,780–0,890; 1,580–1,750	• наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности;
Пространственное разрешение:	1 км	• наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов;
Ширина полосы съемки:	2250 км	• оценка концентрации взвешенных веществ
Периодичность съемки	26 дней (при съемке в надире)	
Prism, Avnir-2 (ALOS)		
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 691,65 км	• Инвентаризация и контроль строительства объектов инфраструктуры транспортировки и добычи нефти и газа;
Режимы:	Спектральный диапазон, мкм	• мониторинг экологического состояния акваторий в районах добычи, переработки, транспортировки нефти и газа, других полезных ископаемых;
PRISM (панхроматический)	0,520–0,770	• определение оптических характеристик поверхностных вод;
AVNIR-2 (мультиспектральный)	голубой: 0,420–0,500 зеленый: 0,520–0,600 красный: 0,610–0,690 ближний ИК: 0,760–0,890	• анализ биопродуктивности фитопланктона;
Пространственное разрешение:	2,5 м (PRISM); 10 м (AVNIR-2)	• наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности;
Ширина полосы съемки:	35 км (PRISM); 70 км (AVNIR-2)	

Основные технические характеристики	Область применения в целях исследования океана												
Периодичность съемки 46 дней (PRISM) 23 дня (AVNIR-2)	<ul style="list-style-type: none"> • наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • оценка концентрации взвешенных веществ 												
RapidEye													
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 630 км												
Режимы:	Спектральный диапазон, мкм												
Мультиспектральный	синий: 0,440–0,510 зеленый: 0,520–0,590 красный: 0,630–0,6850 крайний красный: 0,690–0,730 ближний ИК: 0,760–0,850												
Пространственное разрешение:	5 м												
Ширина полосы съемки:	77 км												
Периодичность съемки:	24 часа (максимально возможная)												
КМСС («Метеор-М»)													
Рабочая орбита:	солнечно-синхронная, 830 км												
Устройства:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 30%;">МСУ-50</th> <th style="width: 30%;">МСУ-100</th> <th style="width: 10%;">МСУ-200</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Спектральный диапазон, мкм:</td> <td>0,410 0,480 0,630</td> <td>0,550 0,650 0,830</td> <td>0,450 0,550 0,650</td> </tr> <tr> <td>Пространственное разрешение, м:</td> <td>116</td> <td>58</td> <td>29</td> </tr> </tbody> </table>		МСУ-50	МСУ-100	МСУ-200	Спектральный диапазон, мкм:	0,410 0,480 0,630	0,550 0,650 0,830	0,450 0,550 0,650	Пространственное разрешение, м:	116	58	29
	МСУ-50	МСУ-100	МСУ-200										
Спектральный диапазон, мкм:	0,410 0,480 0,630	0,550 0,650 0,830	0,450 0,550 0,650										
Пространственное разрешение, м:	116	58	29										
Периодичность съемки:	2 сут												
<ul style="list-style-type: none"> • Определение оптических характеристик поверхностных вод; • анализ распространения и динамики распределения фитопланктона в целях определения биопродуктивности океана; • наблюдение за состоянием и динамикой ледяного покрова морей и океанов; • определение структуры облачного покрова; • определение концентрации атмосферного аэрозоля; • мониторинг чрезвычайных ситуаций и их последствий; • наблюдение биогенных и нефтяных пленок на водной поверхности; • исследование процессов взаимодействия суша-океан-атмосфера 													

Данные уровня L0 являются «сырой» информацией, полученной со спутника для конкретной сцены (5-минутные «гранулы»). Файлы идентичны по структуре и содержанию, но имеют разные названия (*.PDS у LAADS и *.HDF у OC).

Данные уровня L1A и L1B от OC и LAADS имеют *принципиальное различие*: в файлы от OC включены только 8–16-й каналы, используемые для получения информации о водных объектах, тогда как данные LAADS включают все 36 каналов. Это увеличивает размер файла, однако оставляет возможность использования каналов с разрешением 250 м (1–2) и 500 м (3–7), что может быть актуально для региональных исследований небольшого масштаба.

В отличие от данных MODIS Terra/Aqua исходные данные MERIS Envisat и сенсоров спутников Landsat-5, -7 не являются бесплатными. Европейское космическое агентство открыло бесплатный веб-сервис <http://miravi.eo.esa.int/en/>, позволяющий получать изображения Земли сенсора MERIS спутника Envisat в близком к реальному масштабе времени. Сервис, получивший наименование MIRAVI (сокращение от MERIS Images RAPID Visualisation — быстрая визуализация изображений сканера MERIS), обеспечивает оперативную обработку и представление для Интернет-доступа изображений многоканального сканера MERIS со средней задержкой по времени около 2 ч от момента съемки. Сервис позволяет также осуществлять поиск по дате и просматривать архивные изображения начиная с мая 2006 г.

Прибор MERIS измеряет отраженную от поверхности планеты солнечную радиацию в 15 различных диапазонах: от видимого спектра до близкого к инфракрасному, от 0,407 до 0,905 мкм (см. табл. 2.12). В научных исследованиях данные MERIS в основном используются для индексации цвета поверхности воды в океанах и прибрежных зонах. Цветосинтезированные изображения, выставляемые на сайте MIRAVI, представляют собой композиты трех спектральных каналов R: 0,660–0,670 мкм (7-й канал); G: 0,555–0,565 мкм (5-й канал); B: 0,437–0,447 мкм (2-й канал). Полный охват земной поверхности MERIS выполняет за три дня. Ширина полосы захвата его объектива — 1150 км. Предельное пространственное разрешение снимков — 260 м. С таким разрешением ведется наблюдение за территорией и прибрежной зоной Европы, Африки, Азии и несистематический обзор Американских континентов. Минимальное разрешение этого спектрометра — 1200 м.

Примерное время работы MERIS при прохождении витка — 43,5 мин. Находясь в зоне светового дня, он постоянно в работе. Подробная техническая информация о сенсоре MERIS представлена на сайте ESA http://envisat.esa.int/pub/ESA_DOC/Envisat/MERIS.

Программа Landsat является одной из старейших по созданию и эксплуатации космических систем дистанционного зондирования Земли. Запуск космического аппарата Landsat-1, осуществленный в 1972 г., положил начало практическому использованию американской системы изучения природных ресурсов Земли. Последний КА Landsat-7 был запущен 15 апреля 1999 г. Установленная на спутнике съемочная аппаратура — усовершенствованный тематический картограф Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), обеспечивает съемку земной поверхности в шести каналах с разрешением 30 м; в одном ИК-канале — с разрешением 60 м и одновременную панхроматическую съемку с разрешением 15 м, при ширине полосы обзора для всех каналов около 185 км.

В настоящее время на орбите работают два спутника Landsat-5 и Landsat-7. Технические характеристики установленных на них тематических картографов (ТМ и ЕТМ+ соответственно) представлены в табл. 2.12.

Несмотря на то, что аппаратура спутников Landsat предназначена в первую очередь для изучения природных ресурсов Земли, в частности, для решения вопросов сельского и лесного хозяйства, геологического картирования, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, пространственного планирования территорий, данные этих спутников успешно применяются и для изучения процессов в океане. С этой целью в основном используются композиты трех каналов — R: 0,630–0,690 мкм (3-й канал); G: 0,525–0,605 мкм (2-й канал); B: 0,450–0,515 мкм (1-й канал). В зависимости от поставленных задач составляются изображения разными интерпретациями комбинаций спектральных каналов. Примеры использования изображений, полученных с помощью ТМ Landsat-5 и ЕТМ+ Landsat-7, представлены ниже.

Бесплатные данные Landsat-5, -7 распространяются через Интернет-архив USGS (<http://glovis.usgs.gov/>) в формате GeoTIFF (Geographic tagged image file format). Это открытый формат метаданных, который позволяет включать в файлы TIFF (формат хранения растровых графических изображений) информацию о географической привязке, необходимой для точного пространственного ориентирования космического снимка.

Многие из спутниковых приборов высокого пространственного разрешения видимого диапазона спектра с успехом могут использоваться для морских исследований, в первую очередь в прибрежной зоне, где высокое пространственное разрешение необходимо из-за сильной пространственной изменчивости. К таким приборам высокого разрешения относится QuickBird, предназначенный для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 61 см в панхроматическом режиме и 2,44 м в мультиспектральном режиме при съемке в надир. Основными преимуществами спутника QuickBird являются широкая полоса охвата, высокая метрическая точность, возможность заказа полигонов сложной формы, в том числе, протяженных объектов шириной 3 км. Область применения данных QuickBird чрезвычайно широка: картография, оперативный мониторинг, лесное и сельское хозяйство, отрасли добывающей промышленности, экология. Данные высокого разрешения предоставляются за плату, размер которой зависит от вида съемки. В частности, архивные данные стоят дешевле, съемка по заказу существенно дороже.

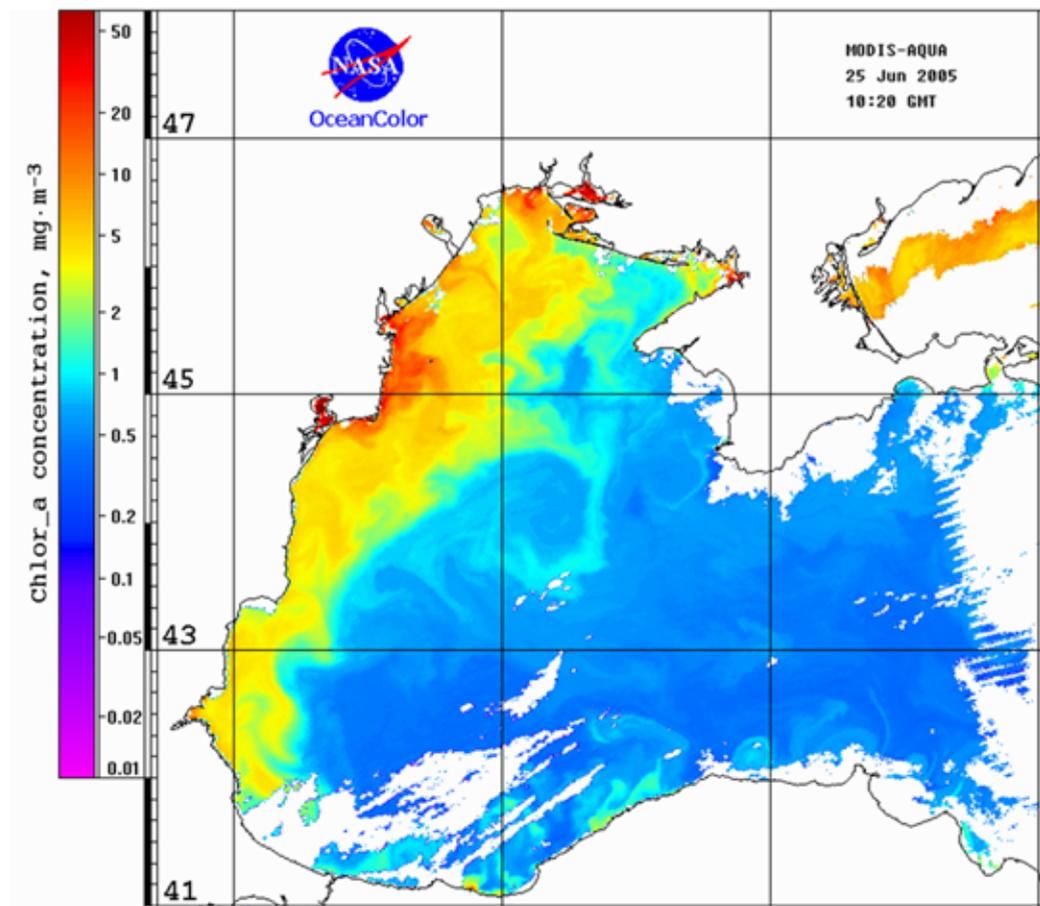
2.4.4. Примеры практического использования спутниковых данных оптического диапазона

Данные спутниковых сканеров оптического диапазона используются, в первую очередь, для контроля состояния морской среды и морской биоты. Ниже приводятся несколько примеров, иллюстрирующих применение спутниковых изображений оптического диапазона для наблюдения и исследования различных процессов и явлений, протекающих в морях.

Распространение речных стоков. Спутниковое изображение, на котором хорошо видно распространение стока Дуная, показано на рис. 2.28 (см. с. 93). На нем приведена карта распределения концентрации хлорофилла (взвеси), построенная по дан-

ным сканера MODIS за 25 июня 2005 г. Сток Дуная выделяется красным цветом в северо-западной части Черного моря как воды с повышенной концентрацией хлорофилла (взвеси). В открытое море эти воды выносятся антициклоническим вихрем, который простирается в юго-восточном направлении за границы шельфа. В Черном море, где Основное черноморское течение как бы отделяет прибрежную зону от открытого моря, такие вихри имеют чрезвычайно важное значение для «вентилиции» прибрежной зоны.

Цветение токсических водорослей. Другой пример использования данных сканеров цвета — обнаружение и контроль за цветением токсических водорослей. Это цианобактерии, которые также называют «сине-зелеными водорослями», поскольку они содержат синеватый и зеленый пигменты — фикоцианин и хлорофилл — и способны к фотосинтезу. Некоторые из форм содержат пигмент фикоэритрин и имеют красный или розовый оттенок («красные приливы»). Цианобактерии вырабатывают ядовитые вещества, которые при высоких концентрациях в воде представляют опасность для зоопланктона, моллюсков, рыбы, птиц, морских животных и даже для человека.



Р и с . 2.28. Карта распределения концентрации хлорофилла по данным сканера MODIS

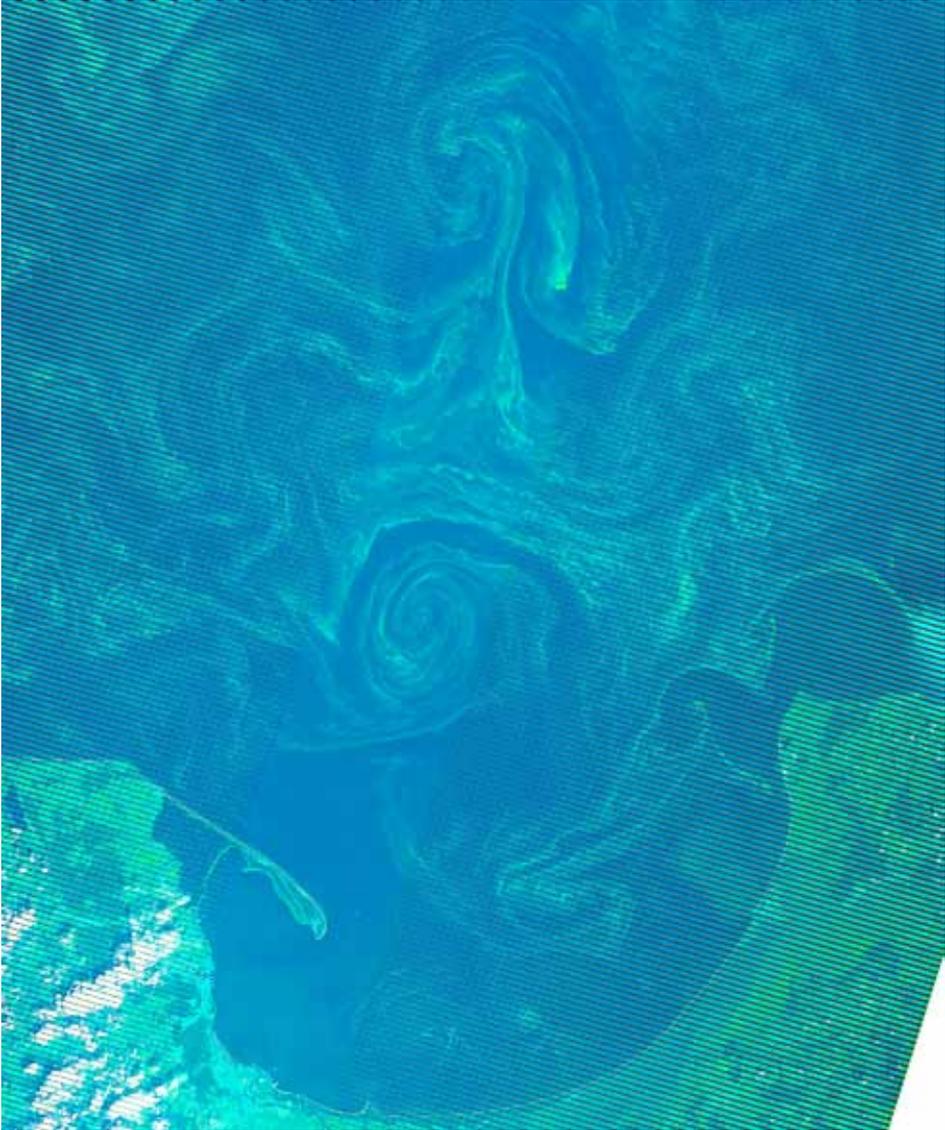


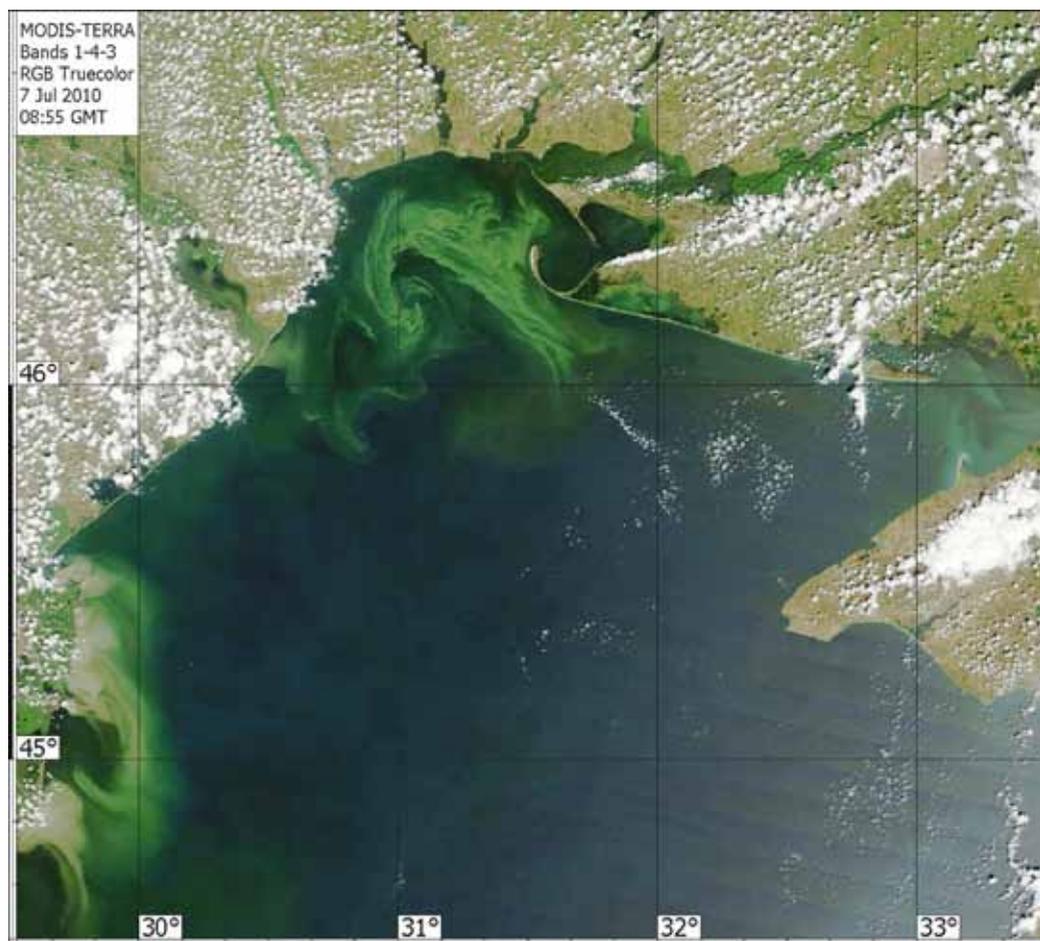
Рис. 2.29а. Интенсивное цветение сине-зеленых водорослей. Цветосинтезированное изображение (каналы 3-й, 2-й, 1-й) сенсора ETM+ Landsat-7, полученное 17.07.2009 в юго-восточной части Балтийского моря

В Балтийском море цветение *Nodularia* регистрируется в разные годы с конца июня до начала августа, при этом концентрация выделяемого этой водорослью токсина нодуларин может достигать более 18 мг/л.

По данным многолетних наблюдений в северо-западной части Черного моря, цветение вод, вызванное массовым развитием различных планктонных организмов, регистрировались относительно часто, характеризуюсь при этом небольшой площадью

и мозаичностью распределения. Однако цианобактерия *Nodularia* до сих пор встречалась в этом регионе лишь в единичных экземплярах. В начале июля 2010 г. в прибрежных водах Одесского региона был зарегистрирован крупномасштабный всплеск цветения сине-зеленых водорослей *Nodularia spumigena*. Это явление оказалось новым и необычным для сложившихся экосистем прибрежных вод Черного моря. Предполагают, что его возникновение связано с повышенным поступлением питательных элементов (в первую очередь азота и фосфора) с городскими и промышленными сточными водами, стоками удобрений с сельскохозяйственных объектов (см. гл. 5).

Примеры цветения цианобактерии *Nodularia* в юго-восточной части Балтийского моря в районе Гданьского залива и в северо-западной части Черного моря (вблизи Одессы) показаны на рис. 2.29а (см. с. 94) и б.



Р и с . 2.29б. Интенсивное цветение сине-зеленых водорослей, цветосинтезированное изображение (каналы 1-й, 4-й, 3-й) сенсора MODIS Terra, полученное 07.07.2010 в северо-западной части Черного моря

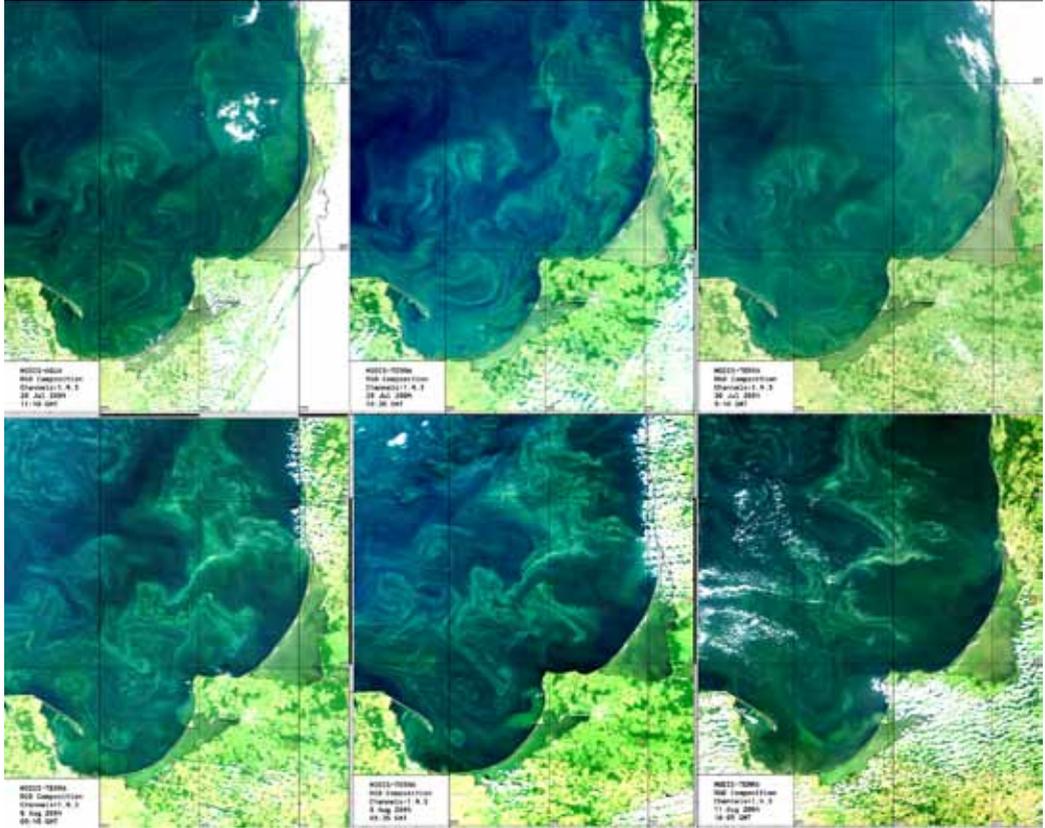
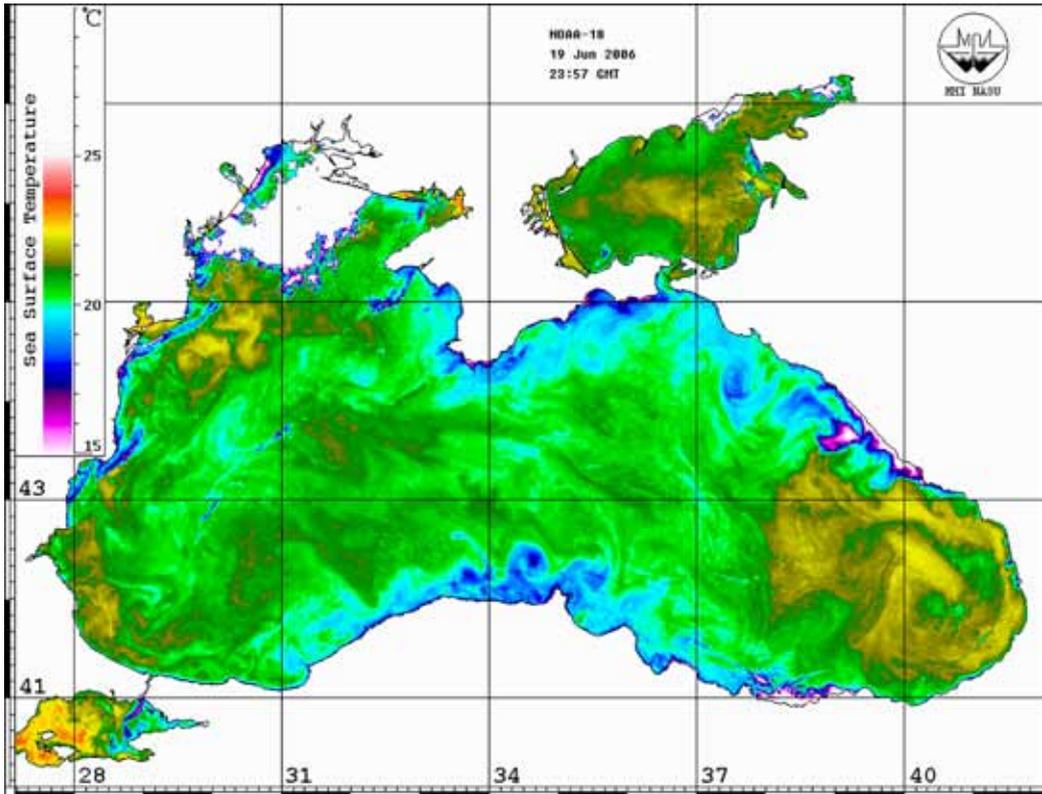


Рис. 2.30. Динамика вод в Гданьском заливе. Серия цветосинтезированных изображений сенсоров MODIS Terra/Aqua с 28 июля по 11 августа 2004 г.

Мезомасштабная динамика. Яркий пример сложной и мезомасштабной динамики вод в юго-восточной части Балтийского моря, наблюдаемой на спутниковых изображениях, приведен на рис. 2.30. Здесь представлена последовательность композиционных изображений сканеров MODIS Terra/Aqua, полученных в период с 28 июля по 11 августа 2004 г. для акватории Гданьского залива. В конце июля – начале августа 2004 г. в этом районе наблюдалось интенсивное цветение сине-зеленых водорослей, которое в летнее время выступает в качестве хорошо регистрируемого трассера, отображающего положение конвергентно-дивергентных зон и, соответственно, структуру течений. Отображение конвергентных зон в виде более светлых (сильнее рассеивающих) полос позволяет выделить сложную структуру вихревых образований и струй. Хорошо видны вихри, филаменты, грибовидные течения, фронтальные зоны. Анализ данных оптических снимков позволил проследить стадии образования мезомасштабных структур и построить пространственное распределение скоростей течений (Lavorova et al., 2008a). Интересно отметить, что обнаруженные на оптических снимках вихри и диполи медленно трансформировались, но в течение двух недель оставались практически на своем месте, несмотря на то, что в отдельные дни скорость ветра достигала 10 м/с при северо-восточном, восточном направлении.



Р и с . 2.31. Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA

На рис. 2.31 представлена карта распределения температуры морской поверхности, восстановленная по данным сенсора AVHRR NOAA-18 для Черного моря. На карте хорошо различимы мезомасштабные вихревые структуры разных знаков. При помощи сенсоров оптического и ИК-диапазонов проводятся спутниковые наблюдения вихревой активности, фронтов, течений, апвеллингов и ледяного покрова в морях и океанах. Разрешающая способность изображений, получаемых при помощи сенсоров MODIS Aqua/Terra и AVHRR NOAA, позволяет изучать мезомасштабную структуру и динамику вод с масштабами более 20 км при отсутствии облачного покрова. Более подробно этот вопрос рассматривается в шестой главе настоящей монографии.

2.5. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Комплексный подход к проведению спутникового мониторинга подразумевает постоянный (в том числе и оперативный) сбор и анализ разнообразной океанографической и метеорологической информации. Эти данные требуются для анализа спутниковой информации и составления прогноза дрейфа, например, нефтяных пятен

в случае их обнаружения. Получить оперативную океанографическую информацию о поле течений, температуре, солёности, плотности, цветении вод и концентрации хлорофилла, содержании взвешенного вещества, ледяном покрове, поле ветра и волнении, зонах конвергенции и дивергенции, апвеллингах, наличии внутренних волн и других процессах в тех или иных районах, где проводить спутниковый мониторинг практически невозможно. Это связано с тем, что океанографические работы ведутся достаточно редко, даже в районах, где настоятельно требуется организация и проведение спутникового мониторинга, например, в районах портов и нефтяных терминалов, морских нефтяных платформ, во время строительства морских газо- и нефтепроводов. При этом одновременные подспутниковые морские измерения существенно ограничены по пространству и времени, что значительно осложняет их сравнение со спутниковыми данными. Доступ же к океанографическим данным, получаемым различными отечественными и зарубежными организациями, по ряду известных причин (международных, организационных, правовых, финансовых, технических) представляет собой сложную задачу, поэтому их использование в оперативном режиме, чаще всего, затруднительно. Тем не менее, такая информация крайне необходима для спутникового мониторинга и нужно использовать любые возможности для ее получения.

К океанографической информации можно отнести также фото- или видеосъемку состояния поверхности моря, сделанную с борта научно-исследовательского судна или с высокого берега, особенно в часы пролета радиолокационных спутников. Нам удавалось это делать неоднократно, что впоследствии позволило правильно интерпретировать радиолокационные изображения водной поверхности, например, в условиях сильного цветения вод или выноса льда в Балтийское море (см. гл. 3).

Следует отметить, что часть необходимой океанографической информации можно получать со спутников, пусть даже и в относительных единицах. Очень часто контрастов или градиентов тех или иных величин (а не знание их абсолютных значений) достаточно для решения ряда задач. Благодаря современным спутниковым технологиям сегодня есть возможность получать информацию о мезомасштабной и мелкомасштабной структуре и динамике вод, температуре поверхности моря, содержании хлорофилла и взвешенного вещества, концентрации и кромке льда, о поле ветра и волн.

Часть спутниковой и океанографической информации используется в численных моделях, которые дают информацию (и прогноз) о поле ТПМ, ледяном покрове, поле течений, ветра и волн, уровне моря, цветении вод и других параметрах. Все это входит в понятие комплексного мультисенсорного и мультиплатформного подхода к организации спутникового мониторинга и давно применяется на практике.

Совсем по-другому обстоит дело с разнообразной метеорологической информацией, которая также необходима для анализа спутниковых изображений и постоянного контроля разного рода гидрометеорологических процессов, влияющих на состояние поверхности морей и океанов. В отличие от океанографической информации, источников оперативной текущей и прогностической метеорологической информации достаточно много и она доступна. Практически по любому району Мирового океана можно найти метеорологические данные, необходимые для организации спутникового мониторинга. Наш опыт показывает, что, при возможности, лучше иметь избыточную метеоинформацию (одни и те же параметры из разных источни-

ков), поскольку поля тех или иных метеопараметров рассчитываются по разным моделям и соответствующие карты или значения параметров могут различаться.

Ниже приведены примеры разнообразной гидрометеорологической информации, которая использовалась нами при проведении комплексного спутникового мониторинга отдельных районов Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей в 2004–2011 гг.

Текущие и прогностические (на сутки) синоптические карты, карты атмосферного давления и облачности, а также спутниковые изображения облачного покрова позволяют понимать основные тенденции в атмосферных процессах над акваториями морей и прилегающими территориями, охарактеризовать гидрометеорологические условия, в которых были получены РЛИ морской поверхности, и заранее судить о погоде (облачность, ветер, осадки и пр.), которую можно ожидать на момент предстоящей радиолокационной съемки, и ее устойчивости (рис. 2.32, 2.33–2.35, см. с. 100–102). Прогноз облачности над исследуемой акваторией (см. рис. 2.34) позволяет заранее оценивать возможность получения спутниковой информации в ИК- и видимом диапазонах по всей исследуемой акватории или ее части.

Поля ветра и волн являются чрезвычайно важными параметрами для корректной интерпретации радиолокационных изображений. В предыдущих разделах уже отмечалось, что небольшие штилевые зоны или зоны ветровой тени могут выглядеть как значительные разливы нефти на РЛИ, а большие штилевые зоны обычно маскируют наличие нефтяных пленок на поверхности моря. Поэтому знания этих параметров на береговых метеостанциях недостаточно и требуется более точная информация по всей исследуемой акватории с максимально высоким пространственным разрешением.

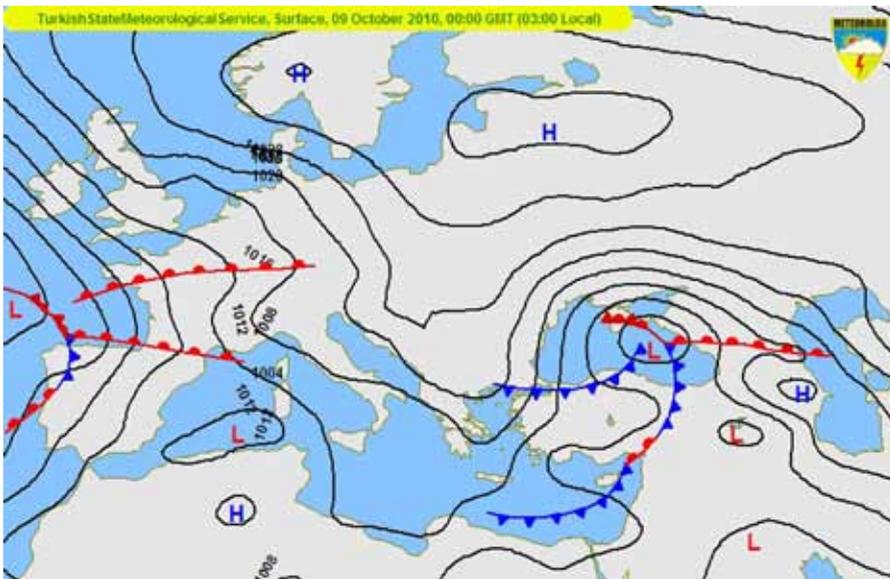


Рис. 2.32. Синоптическая карта Европы на 9 октября 2010 г. (00:00 GMT) по данным Турецкой государственной метеорологической службы

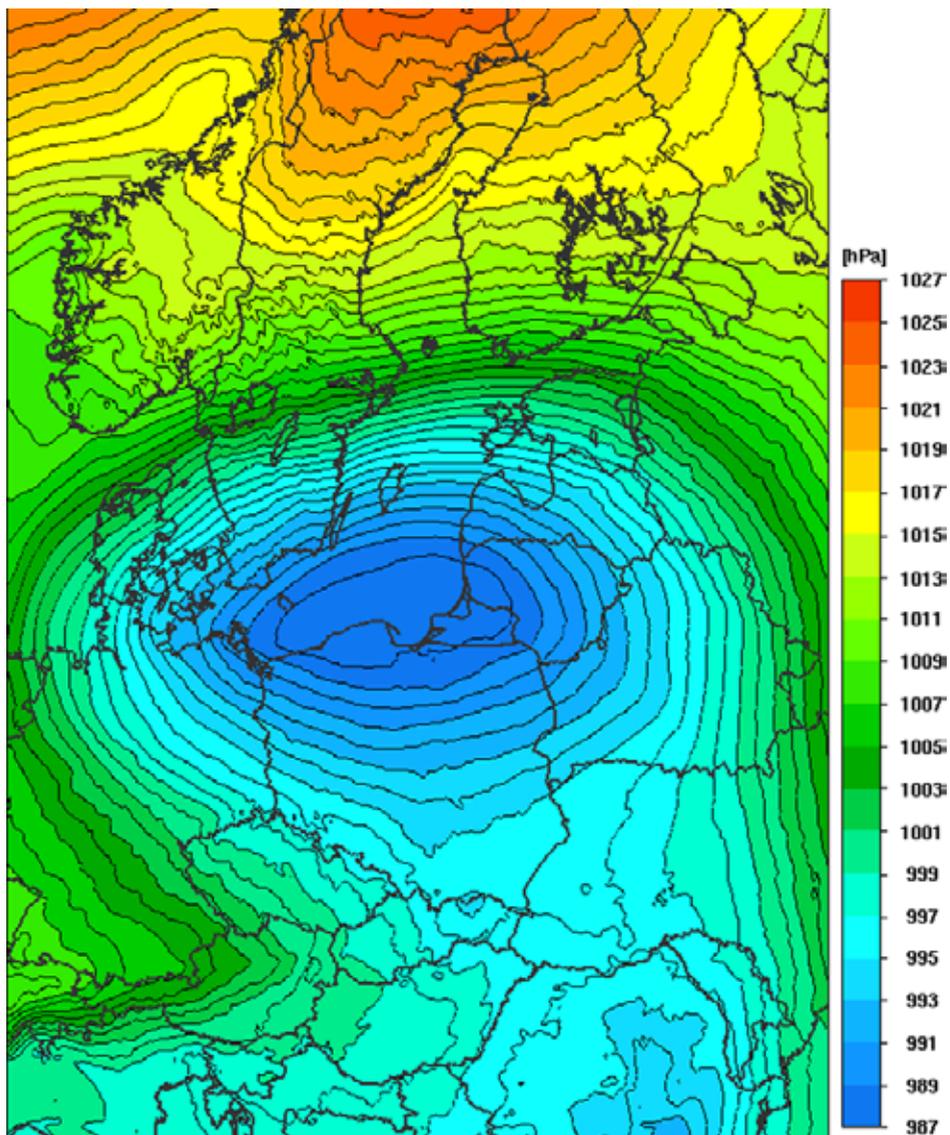


Рис. 2.33. Прогноз атмосферного давления (гПа) в регионе Балтийского моря на 23 ноября 2010 г. (12:00 UTC) по данным Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета

Прогнозы полей скорости/направления ветра и высоты/направления волн использовались для выявления штилевых или штормовых зон, участков атмосферных фронтов и оценки силы и направления ветра при интерпретации РЛИ. Кроме того, информация о направлении ветра использовалась для определения участков ветровой тени вблизи побережья. На рис. 2.36–2.38 (см. с. 102–104) представлены поля ветра и волн в Черном и Каспийском морях.

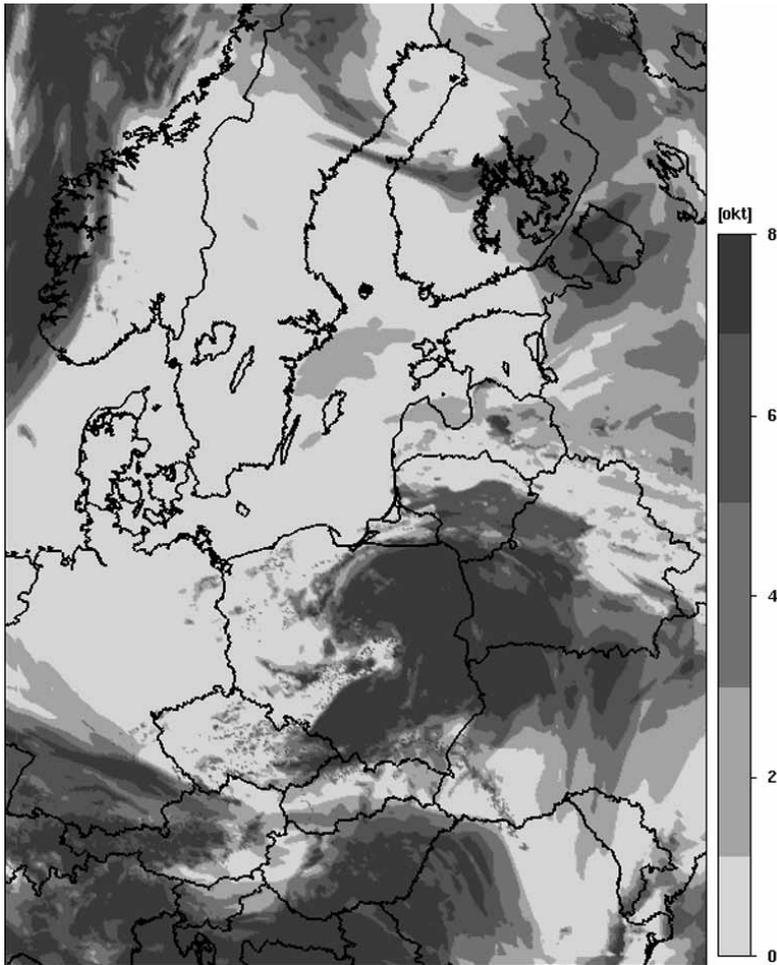
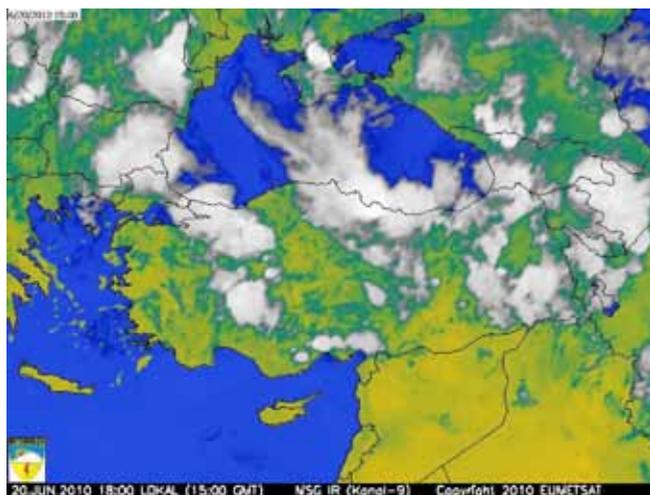
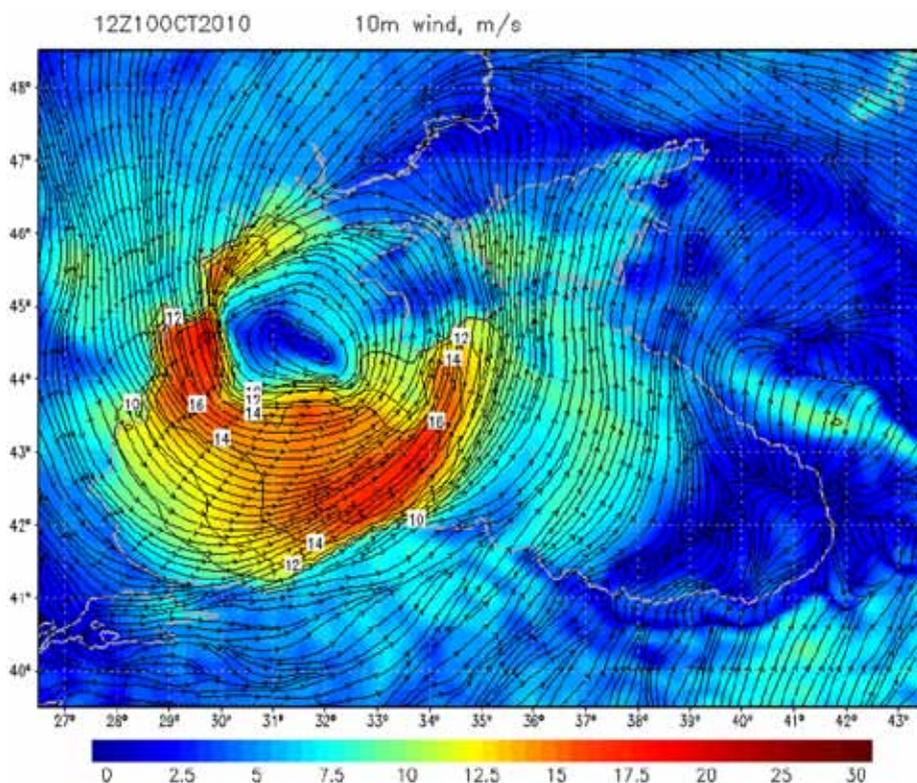


Рис. 2.34. Прогноз общей облачности (окты) в регионе Балтийского моря на 24 апреля 2011 г. (12:00 UTC) по данным Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета

В качестве дополнительной информации о скорости ветра нами использовались данные скаттерометрии SeaWind со спутника QuikSCAT, а о высоте ветровых волн — данные альтиметрических измерений со спутника Jason-1 и результаты расчетов поля ветровых волн по модели WW3 Метеорологического и океанографического вычислительного центра ВМС США (The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, FNMOC, USA). Более подробно об этих данных речь пойдет в гл. 3. В этом разделе мы приведем один пример получения практически мгновенных разрезов в поле скорости ветра и высоты волн с разрешением 6,5 км вдоль трека спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1, пересекающего все Каспийское море с юго-востока на северо-запад (рис. 2.39, см. с. 105). Отметим, что такая информация важна не только для корректной интерпретации РЛИ, но и для навигации судов в море.



Р и с . 2.35. Спутниковое изображение облачности (белые пятна) в регионе Черного моря 20 июня 2010 г. (15:00 GMT) по данным EUMETSAT



Р и с . 2.36. Поле скорости (м/с) и направления ветра в регионе Черного моря 10 октября 2010 г. (15:00 GMT) по данным МГИ НАНУ

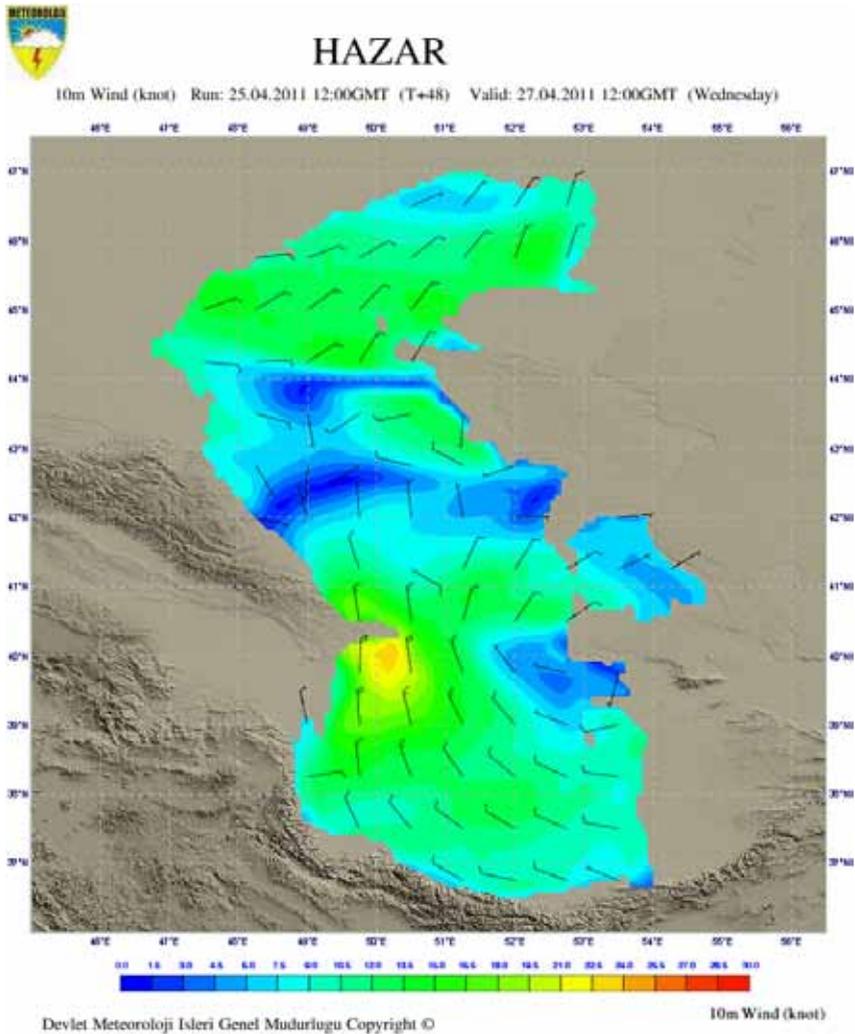


Рис. 2.37. Прогноз скорости (в узлах) и направления ветра над акваторией Каспийского моря на 27 апреля 2011 г. (12:00 GMT) по данным Турецкой государственной метеорологической службы

Осадки в виде дождя и снега могут изменять характеристики шероховатости морской поверхности и влиять на качество интерпретации РЛИ. С целью локализации участков интенсивных атмосферных осадков, отражающихся на РЛИ морской поверхности, использовались данные метеорадаров, расположенных на побережье Балтийского моря. Композиционные изображения распределения интенсивности осадков предоставляются Шведским институтом метеорологии и гидрологии с двухчасовым интервалом (см. рис. 2.39) в рамках совместной европейской программы NORDRAD, в которой задействовано 30 метеорадаров, расположенных в Швеции, Норвегии, Финляндии, Дании и Эстонии.

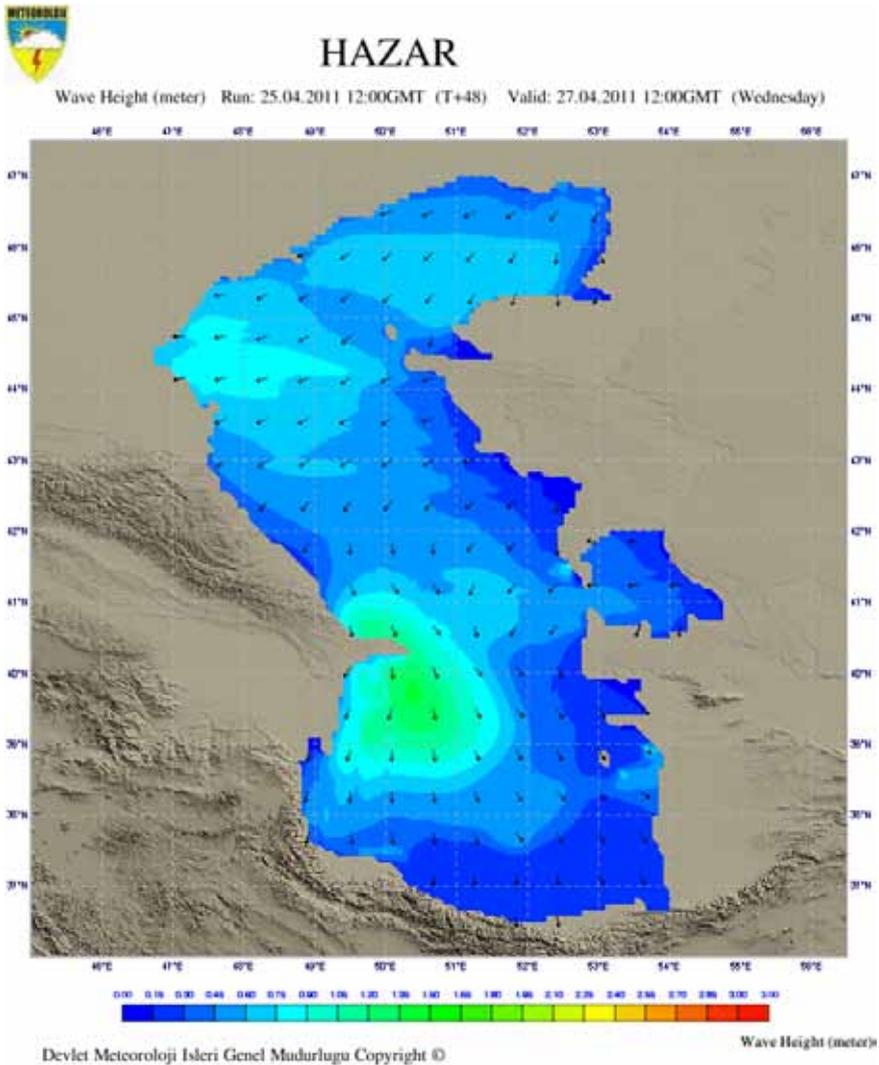


Рис. 2.38. Прогноз высоты (м) и направления ветровых волн над акваторией Каспийского моря на 27 апреля 2011 г. (12:00 GMT) по данным Турецкой государственной метеорологической службы

В отдельных случаях данные метеорадаров выявляли мелкомасштабные интенсивные атмосферные вихри и фронты, которые также «отпечатывались» на РЛИ поверхности моря. Здесь же отметим, что, кроме атмосферных фронтов и вихрей, внутренние волны в атмосфере, при определенных условиях, также проявляются на РЛИ, причем многие из этих атмосферных эффектов на РЛИ имеют вид нефтяных загрязнений, что увеличивает количество ложных тревог.

Информация о пространственном распределении и интенсивности осадков (и их прогноз) над прибрежными зонами чрезвычайно важна для анализа интенсивности

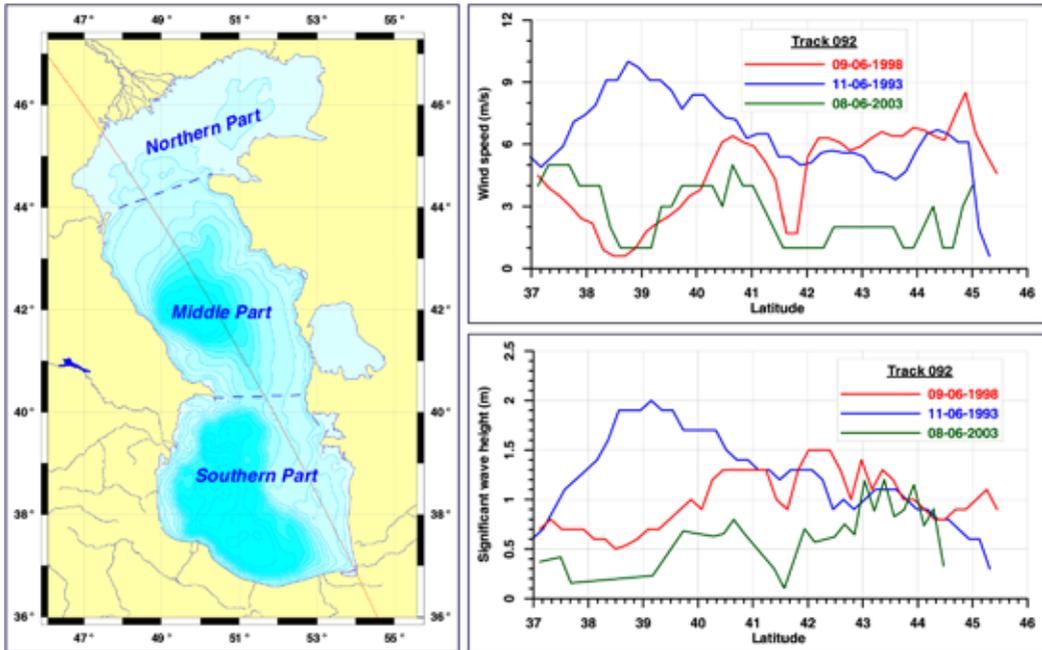
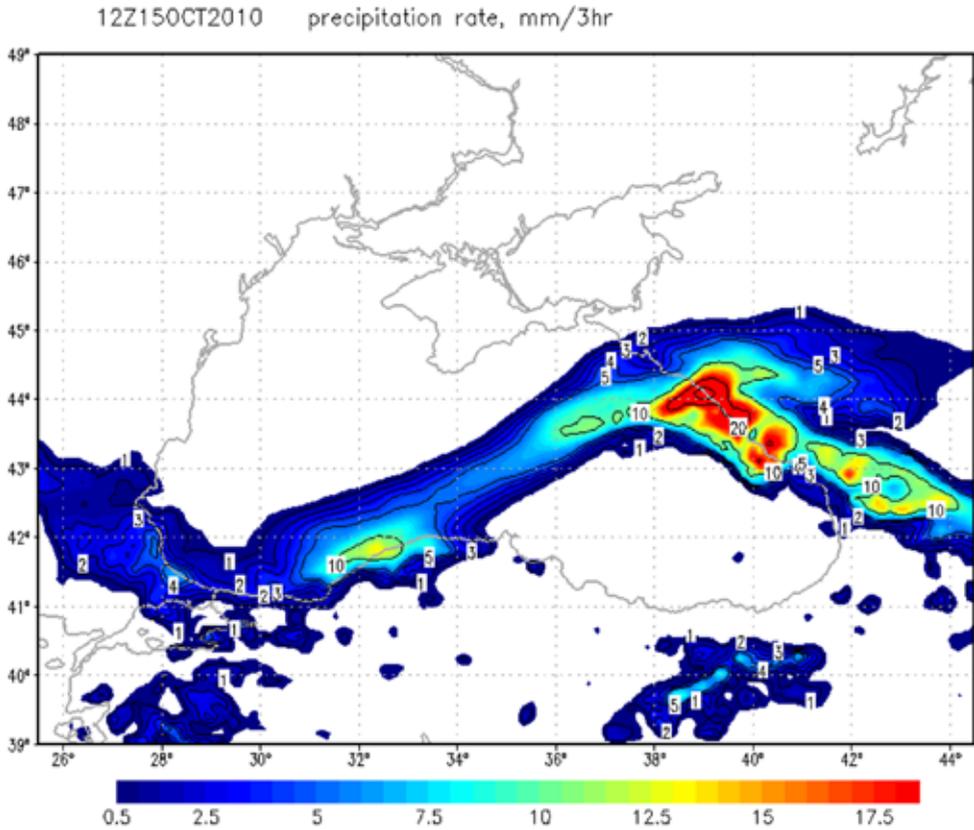


Рис. 2.39. Разрез в поле скорости ветра (м/с) (справа сверху) и высоты волн (м) (справа внизу) вдоль трека спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1, пересекающего все Каспийское море с юго-востока на северо-запад (карта слева). Данные соответствуют пролетам спутников 11 июня 1993 г., 9 июня 1998 г. и 8 июня 2003 г.

стока рек, который, как правило, приводит к увеличению мутности прибрежных вод. Эта информация помогает в разграничении антропогенных эффектов, например, при прокладке морских трубопроводов, и естественных природных факторов, приводящих к увеличению концентрации взвешенного вещества в прибрежной зоне. На рис. 2.40 (см. с. 106) представлена карта интенсивности атмосферных осадков в регионе Черного моря с разрешением 10 км.

Температура воздуха над акваторией моря так же, как и ТПМ, являются важными параметрами, по соотношению которых можно судить о наличии конвекции в приводном слое атмосферы. Этот эффект проявляется в виде «зернистой структуры» на РЛИ и часто маскирует наличие нефтяных загрязнений. На рис. 2.41 (см. с. 107) представлена карта температуры воздуха в Черноморском регионе.

Кроме того, по соответствующим изменениям температуры воздуха в конце осени, например, на Балтике можно судить о возможности появления первого льда в море, который также отражается на РЛИ, причем очень часто в виде аналога нефтяных загрязнений. Для того, чтобы постоянно контролировать ледяной покров и положение кромки льда на акватории морей с момента его появления и до полного исчезновения, требуется анализ специальных карт, которые на Балтике регулярно выпускаются Шведским институтом метеорологии и гидрологии и Финским метеорологическим институтом (рис. 2.42, см. с. 108). Эти композитные карты основаны на данных судовых, прибрежных и спутниковых наблюдений.

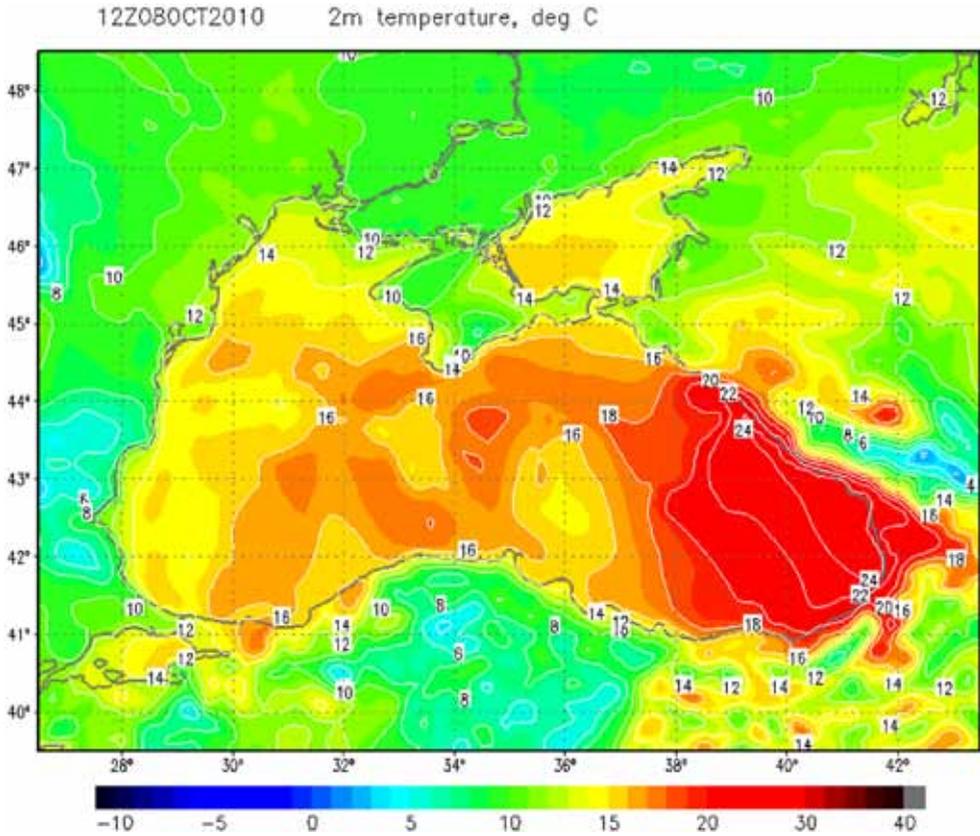


Р и с . 2.40. Прогноз интенсивности атмосферных осадков (мм/3 ч) в регионе Черного моря на 15 октября 2010 г. (15:00 GMT) по данным МГИ НАНУ

Карты содержат информацию о границах распространения льда, концентрации и типе ледовых полей, толщине льда и температуре поверхности моря. Для Черного, Азовского и Каспийского морей такие карты не выпускаются, поэтому положение льда отслеживается, в основном, по оптическим спутниковым изображениям.

Для более точной оценки метеорологических условий в прибрежных зонах морей использовались данные с метеостанций близлежащих городов и аэропортов, в том числе иностранных государств. Набор значений метеорологических параметров обычно включает в себя наблюдения за температурой воздуха, атмосферным давлением, влажностью, скоростью и направлением ветра, облачностью и за явлениями погоды с интервалом 3 часа. Получаемые данные позволяют отслеживать динамику метеорологических процессов вблизи портов, нефтяных терминалов и платформ, районов строительства морских трубопроводов, получать еженедельные статистические характеристики метеоусловий. Они же используются для анализа РЛИ в прибрежной зоне.

Для открытых районов Балтийского моря нами использовались метеограммы, содержащие двухсуточный ежечасный прогноз метеорологических условий в любой точке моря с пространственным разрешением 4 км (рис. 2.43, см. с. 109), подготов-



Р и с . 2.41. Прогноз температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности на 8 октября 2010 г. (15:00 GMT) по данным МГИ НАНУ

ливаемые в Междисциплинарном центре математического и компьютерного моделирования Варшавского университета (Польша). Метеограмма содержит информацию о температуре воздуха, осадках, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра, тумане и облачности.

Комплексный мониторинг не только Балтийского моря, но и Черного, Азовского и Каспийского морей, должен включать в себя наблюдения за цветением моря. Скопления водорослей в период интенсивного летнего цветения могут создавать сликовые области на поверхности моря, проявляющиеся на РЛИ, а также являться естественными трассерами, отражающими особенности мезомасштабной динамики вод, которые можно идентифицировать по спутниковым оптическим изображениям (например MODIS и MERIS). С целью мониторинга цветения вод на Балтике, кроме спутниковых изображений, нами использовались недельные композиционные карты концентрации хлорофилла-*a* на поверхности моря, составляемые Федеральным агентством по судоходству и гидрографии Германии (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)) (см. рис. 3.10, см. с. 151), подготавливаемые на основе спутниковых снимков спектрометра MERIS Envisat.

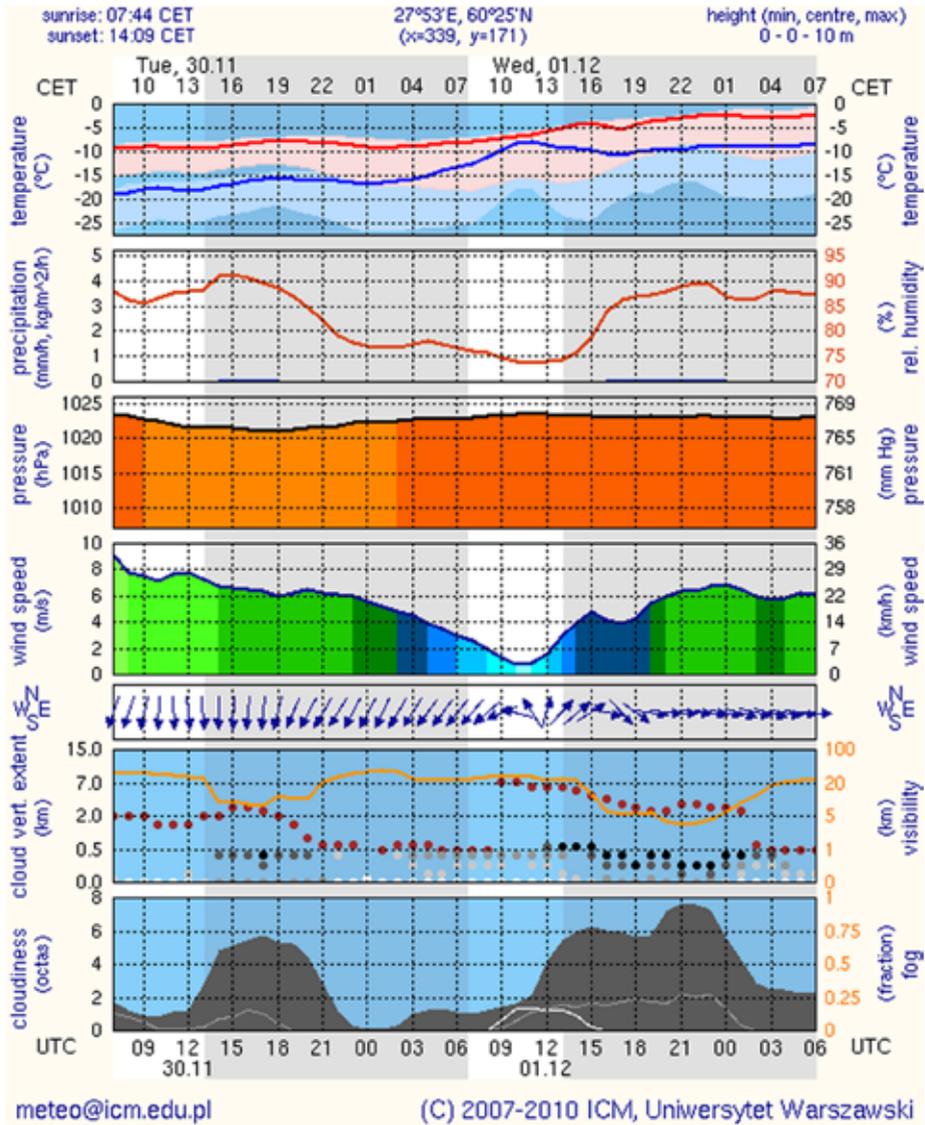


Рис. 2.43. Метеограмма для района бухты Портовой (Финский залив, отправная точка газопровода «Норд Стрим») на 30 ноября – 1 декабря 2010 г. по данным Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета

Кроме того, использовалась оперативная информация Системы наблюдения за водорослями Балтийского моря (The Baltic Algal Watch System) при Шведском институте метеорологии и гидрологии. Эти ежедневные карты распределения участков цветения водорослей с классификацией интенсивности цветения подготавливаются на основе спутниковых данных радиометра AVHRR NOAA и спектрометрического радиометра MODIS Terra/Aqua.

Качественная интерпретация РЛИ морской поверхности в значительной степени зависит от наличия информации о процессах, происходящих как в приводном слое атмосферы, так и в поверхностном слое моря. К таким процессам можно отнести замерзание моря, вариации поля приводного ветра, конвекцию в атмосфере, интенсивность атмосферных осадков, высоту и направление волнения, цветение вод, речные и муниципальные стоки различной природы, ряд динамических факторов в океане и атмосфере.

Комплекс получаемой гидрометеорологической информации позволяет достаточно эффективно оценивать гидрометеорологические условия в исследуемом районе как с целью мониторинга процессов, происходящих в море и атмосфере, так и при дешифрировании РЛИ морской поверхности. Кроме интерпретации РЛИ, эта информация необходима для анализа мезомасштабной динамики вод на поверхности моря, прогноза дрейфа и интерпретации модельных расчетов дрейфа нефтяных пятен.

2.6. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СПУТНИКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Глобальность размеров Мирового океана и большая изменчивость характеристик затрудняют сбор сведений о процессах и явлениях, происходящих в самом океане и атмосфере над ним, поэтому значение его наблюдения из космоса невозможно переоценить. Успешное проведение спутникового мониторинга морских акваторий зависит от наличия достоверной информации, получаемой в результате обзора морской поверхности с помощью различных технических средств, установленных на искусственных спутниках Земли. В настоящее время на орбите функционирует большая группировка специализированных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) разных стран и космических агентств. Не претендуя на полномасштабный обзор этой группировки, состав которой непрерывно меняется за счет выведения на орбиту новых космических аппаратов и прекращения функционирования старых, мы приводим краткое описание спутников, данные которых наиболее широко используются для наблюдения и изучения процессов в Мировом океане и атмосфере над ним.

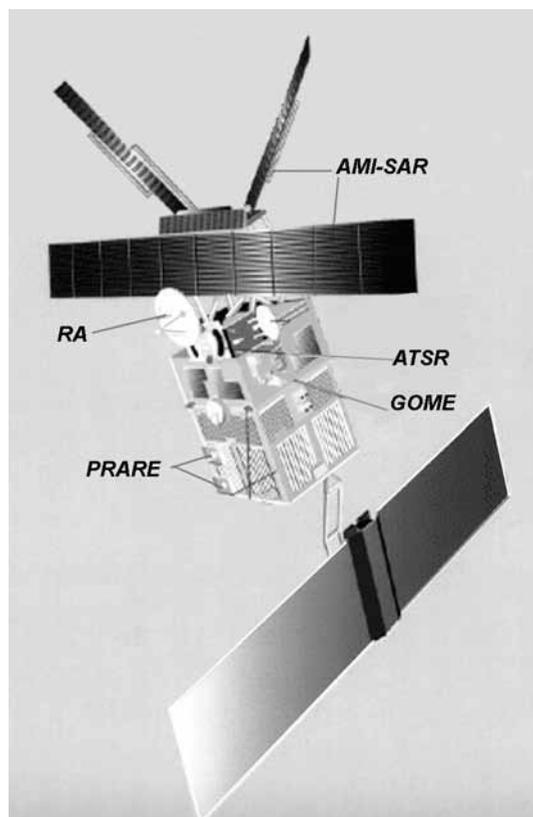
2.6.1. ИСЗ ERS 1/2

Спутниковая система ERS (European Remote Sensing) разрабатывалась Европейским космическим агентством с начала 80-х годов прошлого века. 17 июля 1991 г. на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 785 км и наклоном 98,5° был выведен первый аппарат серии — ERS-1. Второй спутник серии ERS-2, ставший приемником и конструктивным аналогом ERS-1, был доставлен на такую же орбиту 21 апреля 1995 г. Расчетный срок пребывания на орбите спутника ERS-1 оценивался в 3 года, однако аппарат успешно проработал до 10 марта 2000 г., что позволило в течение почти 5 лет использовать группировку из двух спутников ERS 1/2, обеспечивавшую удвоенную частоту съемки подстилающей поверхности. Кроме того, был проведен ряд экспериментов по радиолокационной интерферометрии, в частно-

сти, осуществлен проект ERS Tandem. Срок пребывания на орбите аппарата ERS-2 определялся в 2 года, однако, несмотря на отдельные неисправности, он проработал 16 лет (до 6 июля 2011 г.).

На спутнике ERS-1 было установлено 5 приборов:

1. AMI-SAR (Active Microwave Instrument – Synthetic Aperture Radar) — СВЧ-сенсор, сочетавший в себе возможности работы в режиме как радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) для получения изображений подстилающей поверхности в полосе шириной 100 км и пространственным разрешением 30 м, так и в режиме скаттерометра для измерения характеристик поля приводного ветра и поверхностного волнения в полосе шириной 500 км с пространственным разрешением 50 км.
2. ATSR (Along Track Scanning Radiometer) — пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов для измерения температуры поверхности океана.
3. MWR (Microwave Radiometer) — СВЧ-радиометр для измерения интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы и водозапаса облаков.



Р и с . 2.44. Комплекс приборов дистанционного зондирования Земли ИСЗ ERS-2

4. RA (Radar Altimeter) — альтиметр Ku-диапазона (13,8 ГГц) — предназначенный для измерения уровня Мирового океана и топографических характеристик подстилающей поверхности.
5. PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipment) — высокоточный радиодальномер, обеспечивающий точные траекторные измерения.

На ИСЗ ERS-2 был установлен такой же набор сенсоров и добавился прибор для изучения озонового слоя GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) — спектрометр, работающий в видимом и УФ-диапазонах. Полезная нагрузка ИСЗ ERS-2 представлена на рис. 2.44 (см. с. 111).

2.6.2. ИСЗ Envisat

1 марта 2002 г. Европейским космическим агентством в целях дальнейшего развития программы исследований земной поверхности, начатой спутниками ERS, осуществлен запуск космического аппарата Envisat (Environmental Satellite). Была избрана солнечно-синхронная орбита со средней высотой 790 км, наклоном $98,55^\circ$ и 35-дневным циклом точной повторяемости пролетов по своим трассам. В соответствии с программой миссии глобального мониторинга в целях изучения окружающей среды и безопасности (GMES — Global Monitoring for Environment and Security) на борту спутника установлены различные приборы, работающие в широком диапазоне волн электромагнитного спектра — от микроволнового до ультрафиолетового — и предназначенные для мониторинга Мирового океана, льдов, суши и атмосферы. Полезная нагрузка ИСЗ Envisat представлена на рис. 2.45 и включает в себя следующие сенсоры:

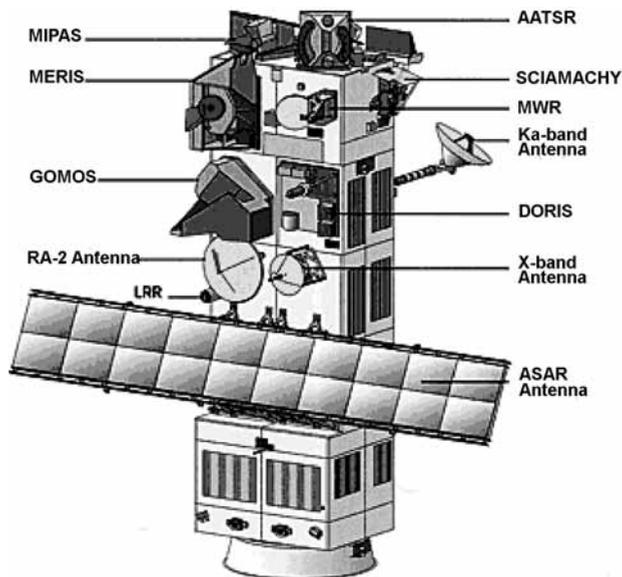


Рис. 2.45. Комплекс приборов дистанционного зондирования Земли ИСЗ Envisat

1. ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) — усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой, позволяющий получать данные с пространственным разрешением от 30 до 1000 м в полосе обзора от 5 до 400 км, вне зависимости от облачности и условий освещенности. Применение фазированной антенной решетки позволяет проводить съемку в интервале углов зондирования от 15 до 45°. Съемка выполняется в С-диапазоне длин волн (5,6 см) на пяти различных поляризациях (VV, HH, VV/HH, HV/HH, VH/HH).
2. RA-2 (Radar Altimeter) — радиолокационный высотомер, работающий в Ku- (13,575 ГГц) и S- (3,2 ГГц) диапазонах.
3. MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) — спектрометр среднего разрешения, фиксирующий солнечное излучение, отраженное подстилающей поверхностью в спектральном диапазоне от 390 до 1040 нм. Ширина полосы обзора составляет 1150 км.
4. MWR (Microwave Radiometer) — двухчастотный СВЧ-радиометр, предназначенный для измерения интегрального содержания водяного пара в атмосфере и содержания жидкой воды в облаках. Осуществляет зондирование в надир на частотах 23,8 и 36,5 ГГц.
5. MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) — фурье-спектрометр среднего инфракрасного диапазона, работающий в интервале длин волн от 4,15 до 14,6 мкм. Прибор предназначен для анализа спектров излучения средней и верхней атмосферы и обнаружения газов, присутствующих в атмосфере в малых концентрациях.
6. GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) — спектрометр умеренного разрешения, работающий в диапазоне длин волн от 250 до 950 нм, предназначен для восстановления профиля содержания озона в стратосфере, кроме того, восстанавливает профили содержания окиси азота и водяного пара.
7. SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography) — спектрометр, измеряющий спектры проходящего, рассеянного и отраженного в атмосфере солнечного излучения в диапазоне длин волн от 240 до 1700 нм. Прибор предназначен для измерения содержания газовых примесей в тропосфере и стратосфере. Высокое спектральное разрешение и широкий диапазон длин волн позволяет детектировать одновременно множество различных примесей, даже если они присутствуют в низких концентрациях. Широкий диапазон длин волн также идеально подходит для обнаружения облаков и аэрозолей.
8. AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) — прибор, измеряющий собственное и отраженное излучение подстилающей поверхности на длинах волн: 0,55; 0,66; 0,87; 1,6; 3,7; 11 и 12 мкм. Предназначен, в основном, для измерения температуры поверхности океана (ТПО) и имеет пространственное разрешение 1 км.
9. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) — микроволновая следящая система, выполняющая задачу точного позиционирования спутника. Система представляет собой двухканальный приемник (401,25 и 2036,25 МГц), сигнал которого принимают более 50 следящих

станций на Земле. Данная система обеспечивает всепогодное глобальное отслеживание положения спутника в пространстве с целью точного определения орбиты и расчета поправок на влияние ионосферы на запаздывание зондирующего и отраженного сигнала альтиметра (см. п. 2.2.5).

2.6.3. ИСЗ RADARSAT 1/2

Спутник RADARSAT-1, созданный под управлением Канадского космического агентства CSA (Canadian Space Agency) во взаимодействии с несколькими частными структурами, является коммерческим космическим аппаратом. RADARSAT-1 оснащен радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА), выполняющим съемку земной поверхности в С-диапазоне (длина волны 5,6 см), на горизонтальной поляризации излучения, в диапазоне углов зондирования от 10 до 59°. Спутник был запущен 4 ноября 1995 г. с авиабазы Ванденберг на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 798 км и наклоном 98,6° с 24-дневным циклом точной повторяемости пролетов по своим трассам. При расчетном сроке эксплуатации 5 лет аппарат RADARSAT-1 функционирует на орбите уже более 15 лет.

В декабре 2007 г. с космодрома Байконур был запущен КА RADARSAT-2, разработанный Канадским космическим агентством и компанией MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.). Этот спутник также работает на солнечно-синхронной орбите, идентичной орбите аппарата RADARSAT-1, и оснащен РСА, обладающей возможностями изменения ширины полосы съемки и пространственного разрешения. Съемка земной поверхности проводится в С-диапазоне длин волн (5,6 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV) в диапазоне съемочных углов от 10 до 60°. Расчетный срок пребывания на орбите — не менее 7 лет. Максимальное пространственное разрешение в режиме Ultra-Fine составляет 3 м в полосе съемки 20 км. Общий вид ИСЗ RADARSAT-2 представлен на рис. 2.46.

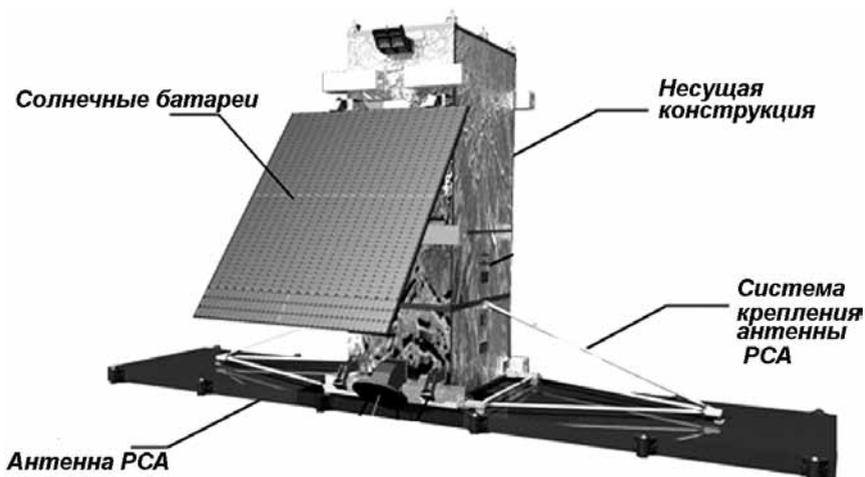


Рис. 2.46. Общий вид ИСЗ RADARSAT-2

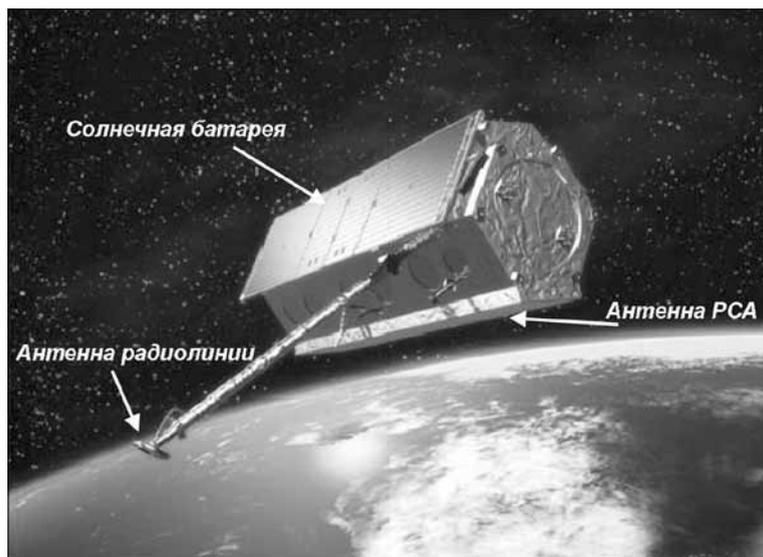


Рис. 2.47. Общий вид ИСЗ TerraSAR-X

2.6.4. ИСЗ TerraSAR-X

Коммерческий спутник TerraSAR-X, разработанный немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией EADS Astrium GmbH (Германия), был запущен 15 июня 2007 г. с космодрома Байконур коверсионной ракетой-носителем «Днепр» на околополярную орбиту со средней высотой 514 км и наклоном 94,44°. Период точной повторяемости витков орбиты составляет 11 суток. РСА, установленный на спутнике TerraSAR-X, позволяет изменять направление радиолокационного луча в диапазоне от 20 до 60°, причем это достигается не механическим движением антенны, а сложением множества отдельных лучей. Съемка осуществляется в X-диапазоне при частоте зондирующего сигнала 9,65 ГГц и длине волны, соответственно, 3 см в следующих режимах:

- прожекторный с разрешением 1–2 м, размером кадра 10×10 км и шириной полосы обзора от 463 до 622 км;
- маршрутный с разрешением 3 м, размером кадра 30×10 км и шириной полосы обзора от 287 до 622 км;
- обзорный с разрешением 16 м, размером кадра 100×150 км и шириной полосы обзора от 287 до 577 км.

Общий вид ИСЗ TerraSAR-X представлен на рис. 2.47.

2.6.5. ИСЗ TOPEX/Poseidon

10 августа 1992 г. на орбиту с высотой 1336 км и наклоном 66,04° для изучения циркуляции и топографии Мирового океана с космодрома Куру во Французской

Гвиане был выведен совместный американо-французский спутник TOPEX/Poseidon (TOPOgraphy EXperiment). Это была первая специализированная программа альтиметрических измерений, основной целью которой было исследование мезомасштабной изменчивости топографии морской поверхности и динамики океана (Wunsch, Gaposchkin, 1980; Fu et al., 1994). Исходя из поставленной задачи, программа TOPEX/Poseidon носила изомаршрутный характер с периодом повторения около 10 суток. Расстояние между подспутниковыми трассами на экваторе составило около 315 км (см. рис. 2.11).

После коррекции орбиты 19 августа 2002 г. пространственное положение подспутниковых трасс изменилось таким образом, что они оказались сдвинутыми на половину расстояния между треками вдоль широт (рис. 2.48). Движение спутника по-прежнему носило изомаршрутный характер с тем же периодом повторения. Спутник успешно функционировал до 18 января 2006 г.

На спутнике TOPEX/Poseidon были установлены приборы (рис. 2.49, см. с. 117):

1. TOPEX NRA (NASA Radar Altimeter) — радар-альтиметр американского производства, работавший на двух частотах: Ku-диапазона (13,575 ГГц) и C-диапазона (5,3 ГГц).

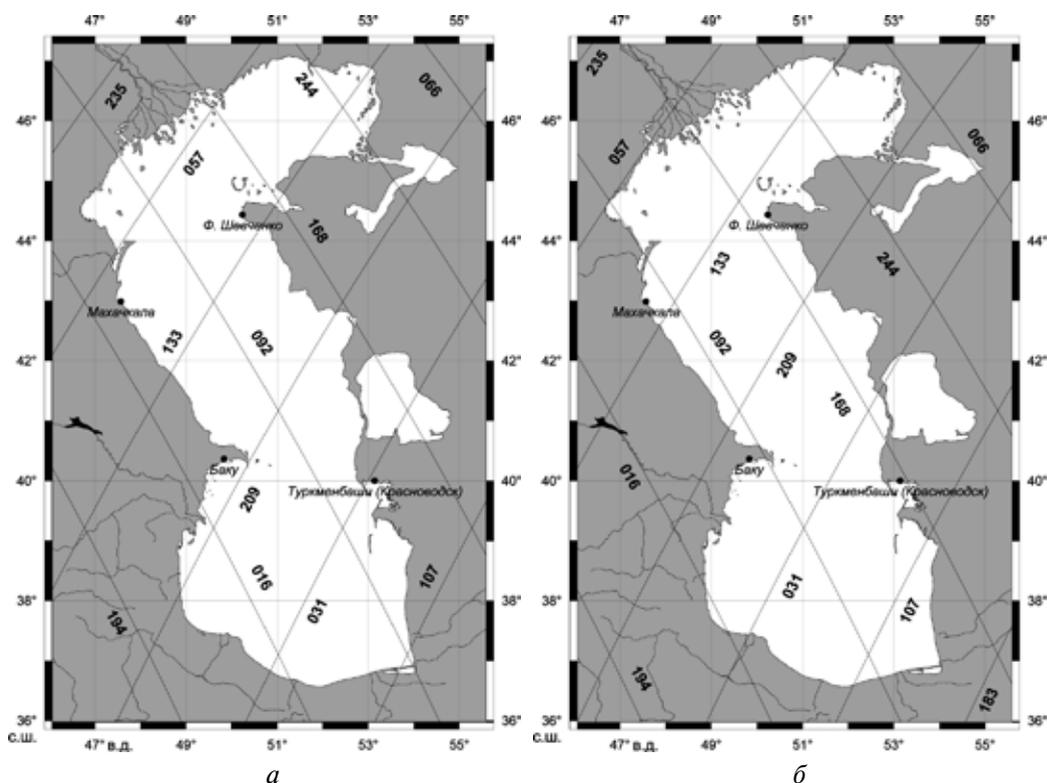


Рис. 2.48. Положение треков спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 на акватории Каспийского моря до (а) и после (б) маневра коррекции орбиты 19 августа 2002 г. и 9 февраля 2009 г. соответственно. Восходящий трек соответствует нечетному номеру, нисходящий трек — четному



Р и с . 2.49. Комплекс приборов дистанционного зондирования Земли ИСЗ TOPEX/Poseidon

2. Poseidon-1 — радар-альтиметр французского производства, работавший на частоте Ку-диапазона (13,65 ГГц) с существенно пониженным потреблением электроэнергии. Оба альтиметра (TOPEX NRA и Poseidon-1) были предназначены для измерения высоты морской поверхности Мирового океана с точностью около 1,7 и 3 см соответственно (см. табл. 2.6), а также для расчета значимых высот морских волн и скорости приводного ветра. Точность определения высоты волн и модуля скорости приводного ветра составила 0,5 м или 10 % для высоты волн менее 10 м и 1,5–2 м/с для скоростей менее 17 м/с (AVISO, 1996; Lefevre, Cotton, 2001).
3. TMR (TOPEX Microwave Radiometer) — трехканальный пассивный микроволновый радиометр, работавший в СВЧ-диапазоне, предназначался для измерения радиояркостной температуры подстилающей поверхности в положении надира антенны радара-альтиметра. Канал 21 ГГц предназначался для измерения интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы. Другие каналы (18 и 37 ГГц) использовались для учета эффекта скорости ветра и облачности соответственно. Получаемая информация позволяла рассчитывать поправку на влажность (см. п. 2.2.5), необходимую для обработки данных измерений альтиметра. Диаметр антенны радиометра составлял 0,6 м, а его пространственное разрешение — 25 км.
4. LRA (Laser Retroreflector Array) — уголкового отражатели лазерной системы слежения, которая представляла собой сеть от 10 до 15 спутниковых станций лазерной локации для калибровки высотомера и отслеживания положения

- спутника в пространстве с целью точного определения его орбиты (*Seeber*, 2003).
5. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) — двухканальный приемник (401,25 и 2036,25 МГц) системы доплеровского слежения (см. ИЗС Envisat в п. 2.6.2).
 6. GPS (Global Positioning System) — приемник Глобальной (спутниковой) системы позиционирования, которая позволяла рассчитать высоту орбиты спутника. Использование современного навигационного оборудования (LRA, DORIS и GPS) обеспечивало точность определения высоты около 5 см (*Smith et al.*, 1994).

2.6.6. ИСЗ Jason 1/2

7 декабря 2001 г. на орбиту был выведен спутник Jason-1. Главной целью запуска стало поддержание непрерывности мониторинга уровня Мирового океана, начатого спутником TOPEX/Poseidon (*Ménard, Fu*, 2001; *Ménard et al.*, 2003).

Параметры орбиты этого спутника задавались таким образом, чтобы они полностью повторяли параметры изомаршрутной программы спутника TOPEX/Poseidon (см. табл. 2.7). С января по август 2002 г. спутник Jason-1 работал в тандеме со спутником TOPEX/Poseidon. Разница во времени прохождения вдоль трека составляла 70 с. Это позволило провести калибровку датчиков спутника Jason-1 как по данным TOPEX/Poseidon, так и с привлечением натуральных измерений на калибровочных полигонах (*Chambers et al.*, 2003).

20 июня 2008 г. на орбиту был выведен спутник Jason-2. Главной целью запуска опять же было поддержание непрерывности мониторинга уровня Мирового океана, начатого спутником TOPEX/Poseidon и продолженного спутником Jason-1 (*Lambin et al.*, 2010).

После коррекции орбиты 9 февраля 2009 г., аналогичной коррекции спутника TOPEX/Poseidon, пространственное положение подспутниковых трасс изменилось таким образом, что они оказались также сдвинутыми на половину расстояния между треками вдоль широт (см. рис. 2.48). Движение спутника по-прежнему стало носить изомаршрутный характер с тем же периодом повторения. Спутник продолжает успешно функционировать до настоящего времени.

С июля 2008 по январь 2009 г. спутники Jason 1/2 работали в тандеме. Разница во времени прохождения вдоль трека составляла 60 с. Это дало возможность провести калибровку датчиков спутника Jason-2 как по данным Jason-1, так и с привлечением натуральных измерений на калибровочных полигонах (*Bonnefond et al.*, 2010).

Конструкции обоих спутников Jason 1/2 совпадают (рис. 2.50, см. с. 119), различаются они только приборным оснащением. На спутниках Jason 1/2 установлены следующие приборы:

1. Poseidon-2 (спутник Jason-1) и Poseidon-3 (спутник Jason-2) — радары-альтиметры, работающие на двух частотах: Ku-диапазона (13,575 ГГц) и S-диапазона (5,3 ГГц) (*Carayon et al.*, 2003; *Desjonquères et al.*, 2010). Альтиметры предназначены для измерения высоты морской поверхности Мирового океана с точностью около 1,7 см (см. табл. 2.6), а также для расчета



Р и с . 2.50. Комплекс приборов дистанционного зондирования Земли спутников Jason 1/2

значимых высот морских волн и скорости приводного ветра. Точность определения высоты волн и модуля скорости приводного ветра составила 0,4 м (или 10 % для высоты волн менее 20 м) и 1,5–1,7 м/с для скоростей от 3 до 20 м/с (*Menard, Haines, 2001; Picot et al., 2008; Dumont et al., 2009*).

2. JMR (Jason Microwave Radiometer) (спутник Jason-1) и AMR (Advanced Microwave Radiometer) (спутник Jason-2) — трехканальные пассивные микроволновые радиометры, работающие в СВЧ-диапазоне (*Brown et al., 2004*). Предназначены для измерения радиояркостной температуры подстилающей поверхности в положении надира антенны радара-альтиметра. Канал 23,8 ГГц предназначен для измерения интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы. Каналы 18,7 и 34 ГГц используются для учета эффекта скорости ветра и облачности соответственно. Эта информация позволяет рассчитать поправку на влажность (см. п. 2.2.3), необходимую для обработки данных измерений альтиметра. Диаметр антенны радиометров составляет 0,6 м и 1 м соответственно, а пространственное разрешение — 25 км и 16–20 км.
3. LRA (Laser Retroreflector Array) — лазерная система слежения представляет собой сеть от 10 до 15 спутниковых станций лазерной локации для калибровки высотометра и отслеживания положения спутника в пространстве для точного определения его орбиты (*Seeber, 2003*).
4. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) — двухканальный приемник (401,25 и 2036,25 МГц) системы доплеровского слежения (см. ИЗС Envisat в п. 2.6.2).
5. GPS (Global Positioning System) — приемник Глобальной (спутниковой) системы позиционирования.

2.6.7. ИСЗ QuikSCAT

Спутник QuikSCAT (Quick SCATterometer) (Quick Scatterometer..., 1999) был выведен на орбиту 19 июня 1999 г. Это проект был призван восполнить пробел в измерениях скорости и направления приводного ветра, вызванный выходом из строя японского космического аппарата ADEOS-1 (ADvanced Earth Observing Satellite) в июне 1997 г. Спутник успешно функционировал до 23 ноября 2009 г.

Высота его орбиты на экваторе составляла 803 км, наклонение орбиты — $98,616^\circ$, период обращения — 100,9 мин, продолжительность изомаршрутного цикла — 4 суток. Ширина полосы измерений вдоль трека позволяла получать данные 2 раза в сутки для любой акватории.

На спутнике QuikSCAT были установлены приборы (рис. 2.51):

1. SeaWind — двухлучевой скаттерометр (рефлектометр) конического сканирования подстилающей поверхности, работал на частоте 13,402 ГГц. Это был первый скаттерометр с игольчатой диаграммой направленности, запущенный в космос, что позволяло измерять эффективную площадь рассеяния и параметры ветровых ветров с гораздо более высокой точностью, чем на предыдущих спутниках с веерной диаграммой направленности антенны. Параболическая антенна скаттерометра имела диаметр 1 м. Сканирование проводилось на углах падения 40° для горизонтальной поляризации (H) и 46° для вертикальной поляризации (V). С поправкой на кривизну Земли углы обзора составляли 47 и 55° соответственно. Ширина лучей составляла $1,6 \times 1,8^\circ$ для

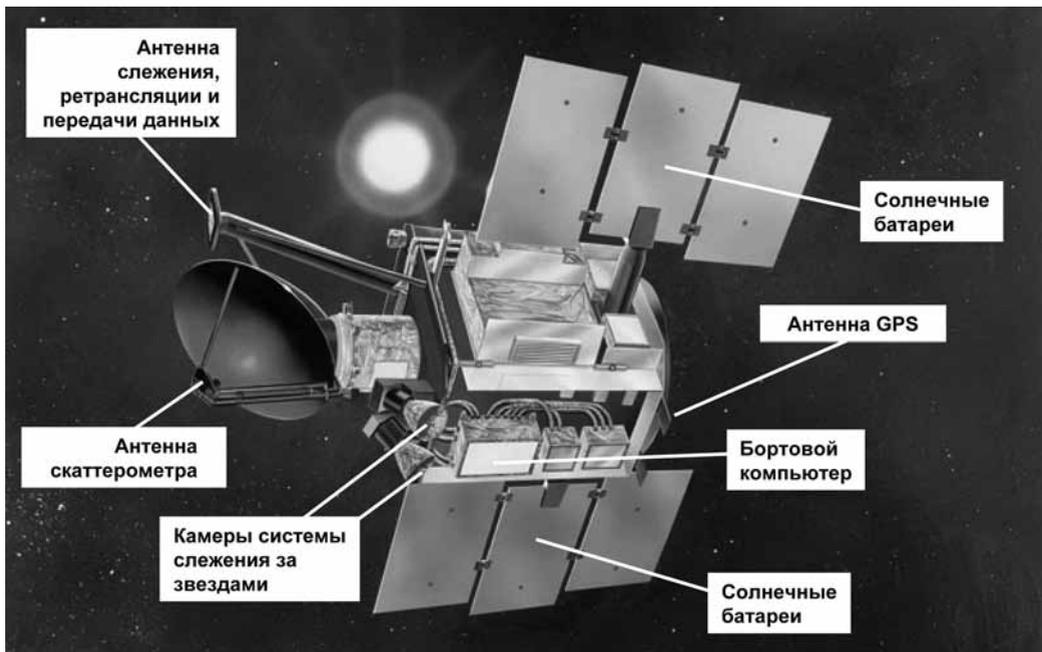


Рис. 2.51. Комплекс приборов ИСЗ QuikSCAT

внутреннего луча и $1,4 \times 1,7^\circ$ для внешнего. Номинальная частота повторения импульсов — 187,5 Гц. Ширина полосы измерений вдоль трека — примерно 1600 км, пространственное разрешение скаттерометра — 25 км. Скорость ветра в диапазоне 3–20 м/с рассчитывалась с точностью 2 м/с и 10 % для скоростей выше 20 м/с, а его направление — с точностью 20° для интервала 3–20 м/с (QuikSCAT, 2001).

2. GPS (Global Positioning System) — приемник Глобальной (спутниковой) системы позиционирования.
3. STC (Star Tracker Camera) — камера системы слежения за звездами, которая производила фотографирование звездного неба. На спутнике были установлены две такие камеры. Каждый кадр имел размер 1024×1024 пиксела, что соответствует угловому обзору $22 \times 22^\circ$. Фотографирование осуществлялось каждые 2 секунды. Далее полученные снимки сравнивались со звездным каталогом, который содержит более 5000 звезд яркостью не менее 6,2 звездной величины. Это позволяло отслеживать движение спутника по звездному небу с точностью до 1 угловой секунды.

2.6.8. ИСЗ серии NOAA

Спутники серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) летают с начала 1970-х гг., первым из этой серии был спутник TIROS-M, запущенный 23 января 1970 г. Оперативная спутниковая система NOAA состоит из геостационарных спутников GOES, предназначенных для краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозирования и мониторинга текущей метеорологической обстановки, и полярно-орбитальных спутников POES, которые предоставляют информацию для более долгосрочных прогнозов. Данные со спутников GOES и POES позволяют производить глобальный мониторинг погодной обстановки.

В настоящей момент на орбите функционируют 5 спутников данной серии: NOAA-15 (запущен 13 мая 1998 г.), NOAA-16 (запущен 21 сентября 2000 г.), NOAA-17 (запущен 24 июня 2002 г., не функционирует в полном объеме начиная с 15 октября 2010 г.), NOAA-18 (запущен 20 мая 2005 г.), NOAA-19 (запущен 6 февраля 2009 г.) Спутники работают на солнечно-синхронной орбите, т. е. каждые сутки проходят над определенной территорией примерно в одно и то же местное время.

Высота орбиты составляет около 840 км с наклоном 99° . Орбиты проходят вблизи полюсов Земли, и с учетом широкой полосы обзора это гарантирует съемку любого участка поверхности с нормальным пространственным разрешением не менее 4 раз в сутки с каждого спутника. Они выводятся на орбиты таким образом, чтобы съемка с разных аппаратов относительно равномерно распределялась по времени. Период обращения вокруг Земли составляет 102 минуты.

Данные полярно-орбитальных спутников NOAA используются для долгосрочных прогнозов погоды, мониторинга атмосферы и погодных явлений, а также для обеспечения безопасности полетов (в том числе для обнаружения облаков вулканического пепла) и водного транспорта (мониторинг и прогнозирование ледовой обстановки). Спутники NOAA также оснащены системами поиска и спасения, которые к настоящему времени помогли спасти более 20 тысяч человеческих жизней.

На спутниках серии NOAA установлены два комплекта приборов: AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) и аппаратура для вертикального зондирования атмосферы. Основным объём информации составляют данные сканирующего радиометра AVHRR.

В комплекс аппаратуры входят.

1. AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer) — радиометр высокого пространственного разрешения, имеющий 5 каналов для получения изображений в видимом/ИК-диапазоне, спектральный диапазон — 0,58–12,5 мкм, полоса обзора — 2000 км, пространственная разрешающая способность в надир — 1,1 км. Предназначен для измерения облачного покрова, температуры поверхности моря и характеристик ледяного, снежного и растительного покровов.
2. AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A) — многоканальный СВЧ-радиометр, имеющий 15 каналов в диапазоне от 1 до 15,89 ГГц. Предназначен для зондирования температуры в любых погодных условиях.
3. MHS (Microwave Humidity Sounder) — самонастраивающийся, 5-канальный микроволновый радиометр, имеющий диапазон частот от 89 до 190,3 ГГц. Предназначен для сбора информации о содержании водяных паров в атмосфере. Пространственная разрешающая способность в надир — 16 км.
4. HIRS/4 (High Resolution Infrared Radiation Sounder) — инфракрасный зонд высокого разрешения, предназначенный для измерения вертикального профиля температуры и влажности, температуры поверхности, параметров облачности и содержания озона в атмосфере. Имеет 19 ИК-каналов (3,8–15 мкм) и 1 канал в видимом диапазоне. Пространственная разрешающая способность в надир — 10 км.

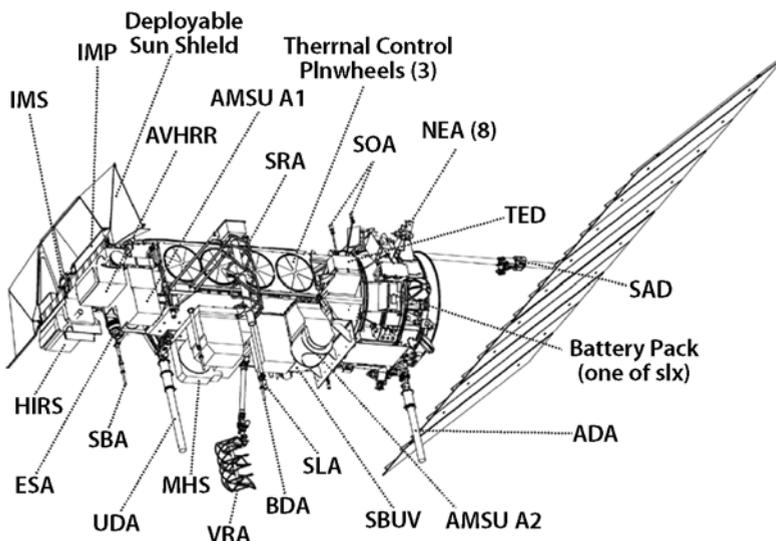


Рис. 2.52. Комплекс приборов спутника NOAA-19

5. SBUV/2 (Solar Backscatter Ultraviolet Spectral radiometer) — спектрорадиометр солнечного рассеянного ультрафиолета. Предназначен для определения глобального и вертикального распределения озона, его структуры и динамики, фотохимических процессов и малых составляющих атмосферы, влияющих на озоновый слой, а также для долгосрочных изменений солнечной активности в УФ-диапазоне.
6. SEM/2 (Space Environment Monitor) — многоканальный спектрометр заряженных частиц для измерения состава радиационных поясов Земли и плотности потока Солнечного ветра. Обеспечивает классификацию частиц по типу, направлению полета и энергии.
7. SARP (Search and Rescue) — аппаратура системы поиска и спасения. Предназначена для обнаружения терпящих бедствие кораблей и самолетов по сигналам автоматических радиобуев ELT и радиомаяков EPIRB на частотах 121,5; 243 и 406 МГц. В комплект бортовой аппаратуры входят ретранслятор SARR/2 и процессор SARP/2.
8. ADCS (Advance Data Collection System) — усовершенствованная система сбора данных.

Полезная нагрузка ИСЗ NOAA-19 представлена на рис. 2.52 (см. с. 122).

2.6.9. ИСЗ MetOp

MetOp (Meteorological Operational) — метеорологический спутник Европейского космического агентства, созданный компанией EADS Astrium в рамках совместного сотрудничества Европейского космического агентства и Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT). Первый из планируемой серии трёх спутников — MetOp-A — был выведен на орбиту 19 октября 2006 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем нового поколения «Союз-2» этапа 1а с модернизированным разгонным блоком «Фрегат». Второй спутник — MetOp-B — должен сменить MetOp-A в 2012 г., третий — MetOp-C — планируется к запуску в 2016 г. Гарантированный ресурс каждого спутника рассчитан на 5 лет. Метеорологические спутники MetOp созданы для замены так называемых «утренних метеорологических спутников» (серии NOAA), используемых для прогноза погоды. В силу особенностей их приполярной солнечно-синхронной орбиты высотой 837 км и наклоном 98,7° аппараты проходят над всеми наблюдаемыми регионами примерно в одно и то же время — в локальные утренние часы. Управление и контроль собственными спутниками и наземными сегментами EUMETSAT и NOAA осуществляется раздельно, но все данные, полученные со спутников, доступны как NOAA, так и EUMETSAT.

На спутниках установлено оборудование, обеспечивающее совместимость данных метеонаблюдений с существующими сегодня форматами, а также датчики нового поколения, позволяющие более точно определять температуру и влажность атмосферы, содержание в ней озона, скорость ветра и направление движения воздушных масс. Аппараты серии MetOp также оснащены приборами, предназначенными для наблюдения поверхности Земли и поиска терпящих бедствие судов и самолетов. Спутники серии MetOp несут на борту восемь измерительных приборов и ряд коммуникационных

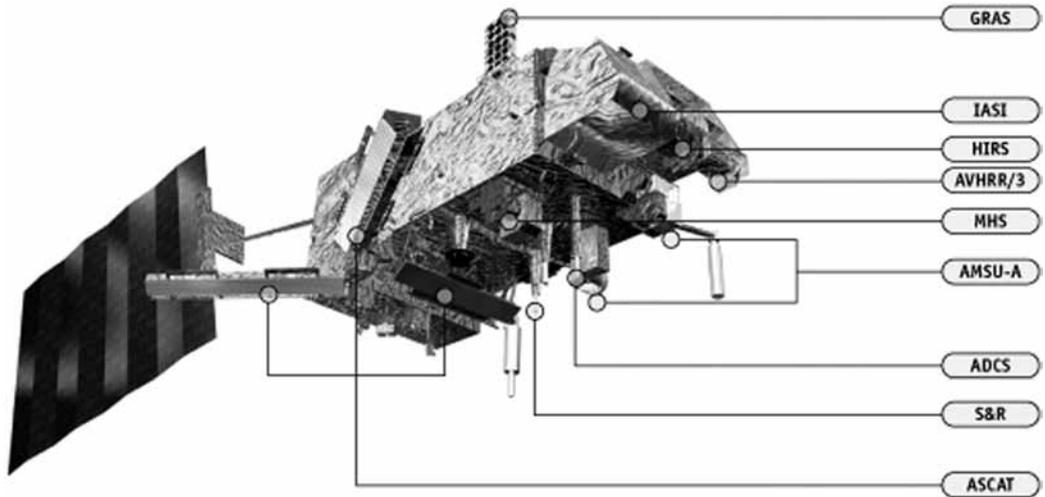


Рис. 2.53. Комплекс приборов спутника MetOp

и обслуживающих систем. Основной состав приборов, предназначенных для зондирования и получения изображений Земли, идентичен комплекту, установленному на спутниках NOAA:

1. AVHRR/3 — см. ИСЗ NOAA-19.
2. A/DCS (Advanced Data Collection System) — система сбора данных с платформ и передачи их на космические аппараты.
3. AMSU — A1/A2 см. ИСЗ NOAA-19.
4. ASCAT (Advanced scatterometer) — импульсный скаттерометр, работающий в С-диапазоне на частоте 5,255 ГГц. Предназначен для глобальных измерений направления приводного ветра с пространственным разрешением <50 км.
5. GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) — спектрометр, работающий в УФ- и видимом диапазонах, предназначенный для измерения радиации, отраженной от поверхности Земли и рассеянной в атмосфере.
6. GRAS (GNSS Receiver for Atmospheric Sounding) — радиозатменный приемник для получения информации высокой точности о температуре и влажности в стратосфере и верхних слоях тропосферы. Использует сигналы спутников системы GPS.
7. HIRS/4 — см. ИСЗ NOAA-19. На MetOp-C будет смнен на IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer).
8. MHS — см. ИСЗ NOAA-19.
9. SEM-2 — см. ИСЗ NOAA-19.
10. SARP/3 (Search and Rescue Processor) и SARR (Search and Rescue Repeater) — СВЧ-УВЧ-передатчик/обработчик сигналов для обнаружения терпящих бедствие кораблей и самолетов по сигналам автоматических радиобуев ELT и радиомаяков EPIRB.

Полезная нагрузка ИСЗ MetOp представлена на рис. 2.53.

2.6.10. ИСЗ Terra и Aqua

Космические аппараты Terra и Aqua являются частью комплексной программы NASA EOA (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и состоящей из трех специализированных спутников Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Одним из ключевых инструментов американских спутников серии EOS является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах, и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250 м.

ИСЗ Terra

Космический аппарат Terra (рис. 2.54) запущен NASA 18 декабря 1999 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник находится на солнечно-синхронной полярной орбите высотой 705 км, наклонение — $98,2^\circ$. КА Terra пересекает экватор, двигаясь с севера на юг в 10:30 по местному времени. Среди других приборов на его борту установлен аппаратный комплекс дистанционного зондирования ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Своему появлению ASTER обязан совместному проекту NASA, японского министерства экономики, торговли и промышленности (METI) и японского Центра анализа данных ДЗЗ (Earth Remote Sensing Data Analysis Center — ERSDAC).

Комплекс ASTER состоит из 3 телескопов, работающих в разных спектральных диапазонах с разным пространственным разрешением. Сенсор диапазона VNIR (видимый диапазон и ближний ИК), позволяет получать данные с пространственным разрешением до 15 м, SWIR (коротковолновый ИК-диапазон) — с разрешением 30 м

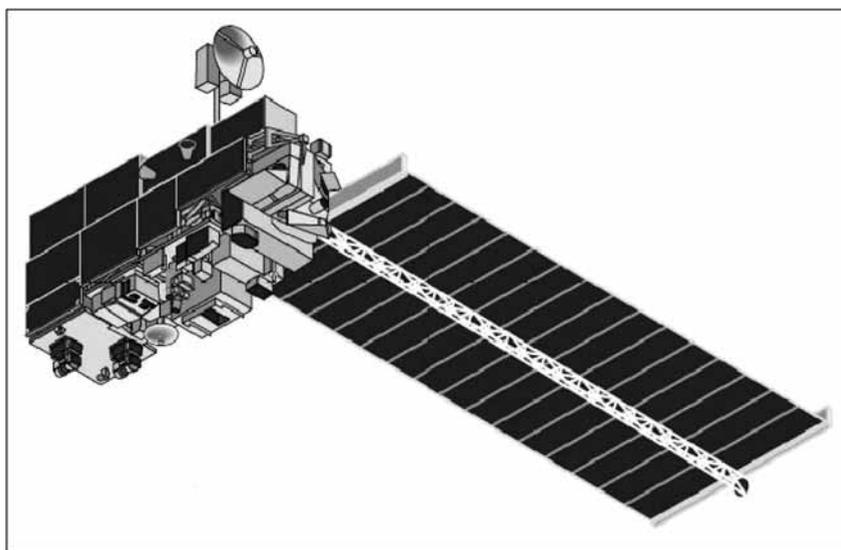


Рис. 2.54. Общий вид ИСЗ Terra

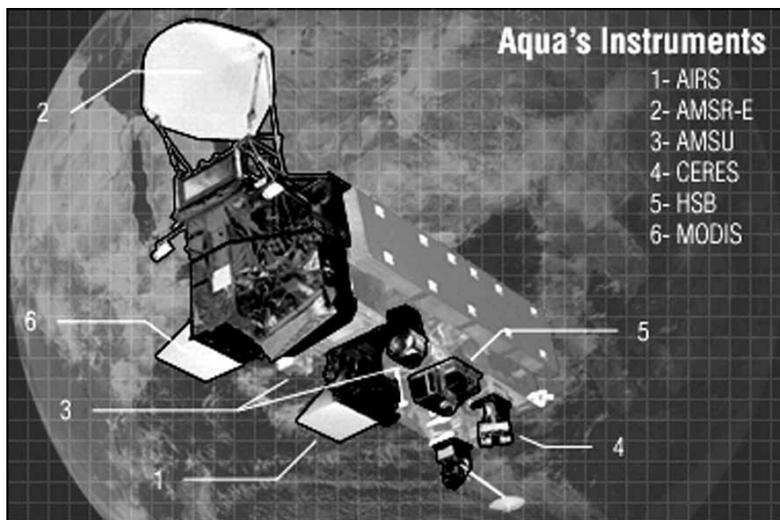
и TIR (тепловой ИК-диапазон) — с разрешением 90 м. Полоса обзора для всех сенсоров одинакова и составляет 60 м. Основное достоинство комплекта — широкий спектральный диапазон и возможность стереосъемки. Комплекс ASTER не ведет постоянный сбор данных, и его сенсоры активируются только для съемки по запросу.

1. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) — усовершенствованный термально-оптический радиометр, осуществляющий 14-канальную съемку в диапазоне от 0,52 до 11,65 мкм с разрешением 15–90 м и стереосъемку в диапазоне 0,76–0,86 мкм. Зоны видимого и ближнего ИК-диапазона предназначены для измерения характеристик снежного покрова, воды, растительности и степени окисления поверхности объектов. Зоны среднего ИК-диапазона оптимальны для распознавания минералов, в особенности гидратированных минералов в глинистых почвах. Зоны теплового диапазона предназначены для регистрации температуры земной поверхности и дешифрирования основных типов горных пород.
2. MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) — сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения, осуществляющий гиперспектральную 36-канальную съемку в диапазоне от 0,45 до 14,36 мкм с разрешением 250–1000 м.
3. MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer) — многоугловой сканирующий спектрорадиометр, позволяющий определять отражательные характеристики объектов в девяти разных направлениях. Четырехзональная съемка под 9 углами наклона осуществляется в диапазоне от 0,42 до 0,87 мкм с разрешением от 250×275 до 1100×1100 м. Изменение отражения света при разных углах наблюдения позволяет распознавать различные типы атмосферных аэрозолей, форму облаков, покровы поверхности суши. При привлечении стереоскопических методов анализа изображений возможно наблюдение пространственных моделей местности и структур облачности.
4. CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) — система изучения облачности и излучения Земли. Съёмочная система предназначена для изучения влияния облачного покрова на радиационный баланс Земли. Съёмка проводится в трех широких спектральных зонах в диапазоне от 0,3 до более 100 мкм с разрешением от 20 км в надире. На борту спутника имеются 2 одинаковых прибора, которые измеряют суммарный радиационный баланс Земли и (совместно с данными MODIS по облачному покрову) обеспечивают оценку характеристик облачности, что позволяет оценить влияние облачности на тепловое излучение Земли. Один прибор работает в режиме поперечного сканирования, а второй, вращаясь, выполняет сканирование по образующей конуса.
5. MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) — 4-канальный корреляционный спектрометр, предназначенный для измерения загрязнения в тропосфере. Позволяет определять на основе измерений характеристик уходящего инфракрасного излучения вертикальные профили окиси углерода и общее содержание метана в тропосфере. Измерения ведутся в трех спектральных диапазонах 2,3; 2,4 и 4,7 мкм с пространственным разрешением 22 км в надире.

ИСЗ Aqua

Космический аппарат Aqua был запущен 4 мая 2002 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник выведен на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км. На его борту работали шесть научных инструментов (рис. 2.55), четыре из которых изготовлены NASA, один — японским космическим агентством NASDA и один — бразильским институтом космических исследований INPE. Приборы, установленные на ИСЗ Aqua, предназначались для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, а также температуры атмосферы Земли и ее влажности:

1. MODIS — см. ИСЗ Terra.
2. AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) — усовершенствованный 12-канальный микроволновой сканирующий радиометр для измерения радиояркостной температуры уходящего (микроволнового) излучения Земли на частотах 6,9, 10,65, 18,7, 23,8 36,5 и 89,0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях в полосе шириной 1450 км. Позволял получать регулярные данные о влагозапасе атмосферы, содержании водяного пара, водозапасе облаков, скорости приводного ветра, температуре поверхности океана, сплоченности ледяного покрова океана независимо от времени суток и состояния погоды.
3. AMSU-A — см. ИСЗ MetOp.
4. AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) — прибор, измеряющий температуру и влажность атмосферы, температуру суши и морской поверхности.
5. HSB (Humidity Sounder for Brazil) — 4-канальный микроволновой прибор, разработанный бразильскими специалистами для определения влажности в атмосфере. Закончил свою работу в феврале 2003 г.
6. CERES — см. ИСЗ Terra.



Р и с . 2.55. Комплекс приборов ИСЗ Aqua

2.6.11. ИСЗ серии Landsat

Американская программа LANDSAT — одна из наиболее продолжительных и успешных программ исследования Земли из космоса. С 1972 г. в рамках программы было запущено 7 спутников, один из запусков (Landsat-6) был неудачным. Хотя программа LANDSAT управлялась NASA, данные съемок обрабатываются и распространяются Геологической службой США (USGS).

Все спутники Landsat выводились на субполярные солнечно-синхронные орбиты. Высота орбит первых трех спутников составляла 900 км, период повторяемости съемки равнялся 18 дням. Следующие спутники этой серии выводились на орбиты высотой 700 км с периодом повторной съемки 16 дней. Спутники Landsat-3, -4, -5 были оснащены двумя типами сканеров, обеспечивающими съемку земной поверхности с различным пространственным и спектральным разрешением — MSS (Multispectral Scanner) и TM (Thematic Mapper). Данные MSS (пространственное разрешение 80 м) доступны с 1972 г., данные TM (пространственное разрешение 30 м в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах, 120 м в тепловом диапазоне) — с 1982 г.

Сейчас на орбите остались только 2 спутника — Landsat-5 (запущен 1 января 1984 г.) и Landsat-7 (запущен 15 апреля 1999 г.), которые продолжают обеспечивать получение высококачественных изображений среднего разрешения поверхности Земли. На спутнике Landsat-5 установлены 2 сенсора: MSS и TM, на КА Landsat-7 (рис. 2.56) — радиометр ETM+, который является усовершенствованным вариантом сканеров TM. Существенное отличие прибора — наличие панхроматического канала

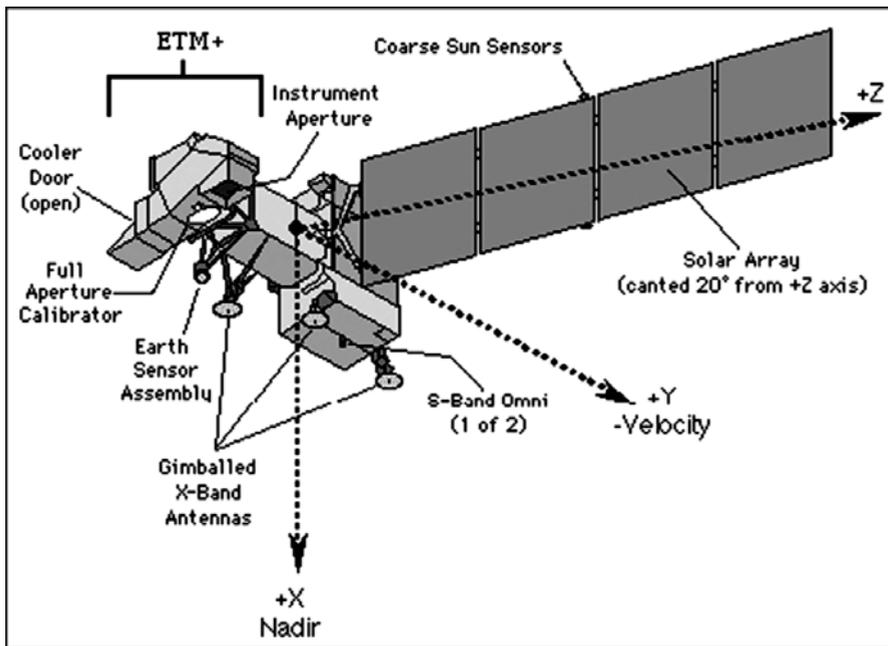


Рис. 2.56. Приборный комплекс ИСЗ Landsat-7

высокого разрешения (15 м). 31 мая 2003 г. была зафиксирована поломка элемента SLC сенсора ETM+, обеспечивающего компенсацию движения спутника. Поэтому в результате зигзагообразной съемки снимки аппарата Landsat-7 получаются в SLC-off виде с дублированием линий, что в свою очередь увеличивает размер сцены и ухудшает ее качество. Данный эффект практически сводится к минимуму в центральной части снимка. Качество в этой части изображения приближается к прежнему при SLC-on режиме съемки. В связи с возникшими проблемами была возобновлена оперативная эксплуатация спутника Landsat-5, который находится на орбите с 1984 г. и продолжает успешно функционировать.

2.6.12. ИСЗ «Метеор-М» № 1

17 сентября 2009 г. с космодрома «Байконур» был осуществлен запуск КА «Метеор-М» № 1, положивший начало воссозданию российской метеорологической орбитальной группировки. «Метеор-М» № 1 — первый космический аппарат создаваемого ФГУП «НПП ВНИИЭМ» комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М», предназначенного для получения космической информации дистанционного зондирования Земли в интересах оперативной метеорологии, гидрологии, агрометеорологии, мониторинга климата и окружающей среды, в том числе околоземного космоса.

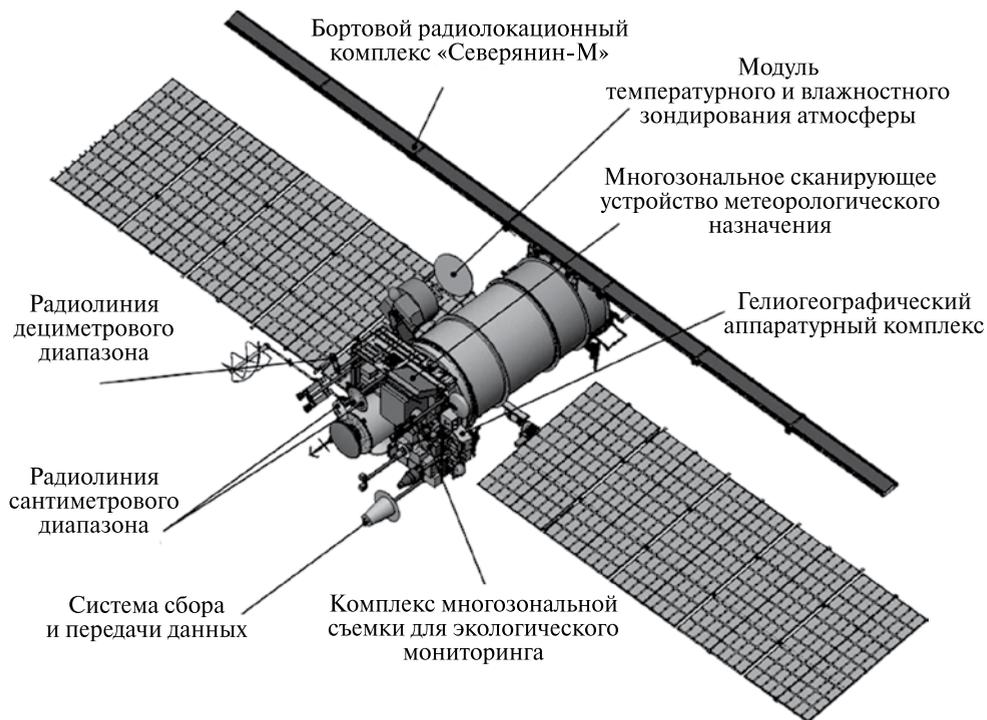


Рис. 2.57. Приборный комплекс приборов ИСЗ «Метеор-М» № 1

Измерительный комплекс ИСЗ «Метеор-3М» будет состоять из следующих приборов:

1. МСУ-МР — многозональное сканирующее устройство малого разрешения, имеющее 6 каналов, осуществляющее съемку в спектральном диапазоне 0,5–12,5 мкм с разрешением 1 км, полоса обзора — 2800 км. Прибор предназначен для глобального и регионального картирования облачности, температуры поверхности океана (ТПО), температуры поверхности суши (ТПС).
2. КМСС — комплекс многозональной спутниковой съемки, предназначенный для картирования земной поверхности. Имеет 6 каналов, спектральный диапазон — 0,370–0,900 мкм, пространственное разрешение — 50 или 100 м, полоса обзора — 450 или 900 км (в зависимости от разрешения).
3. МТВЗА — модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы. Имеет 26 каналов в полосе частот 10,6–183,3 ГГц. Горизонтальное разрешение (в зависимости от канала) — 12–75 км. Предназначен для измерения профиля температуры и влажности атмосферы, определения параметров приводного ветра.
4. БРЛК — бортовой радиолокационный комплекс «Северянин-М», предназначен для мониторинга ледовой обстановки. Рабочая длина волны — 3,2 см, съемка может осуществляться с разрешением 500 м или 1 км в полосе обзора 600 км.
5. ГГСК-М — гелиогеофизический аппаратный комплекс, предназначен для измерения параметров околоземного космического пространства, таких как: плотность потока электронов в энергетических интервалах 0,03–15,0 МэВ; плотность потока протонов в энергетических интервалах 0,5–30,0 МэВ; ионный состав верхней атмосферы в диапазоне 1–20 а. е. м.

Полезная нагрузка ИСЗ «Метеор-М» № 1 представлена на рис. 2.57 (см. с. 129).

Глава 3

ОПЕРАТИВНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ (2004–2005)

ВВЕДЕНИЕ

В июне 2003 г. в связи с предстоящим в марте 2004 г. началом добычи нефти на месторождении «Кравцовское» (Д-6), расположенном на континентальном шельфе Российской Федерации, ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» (Калининград, Россия) инициировало пилотный проект, направленный на организацию комплексного мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики. Добыча нефти должна была осуществляться на морской ледостойкой стационарной платформе Д-6 (рис. 3.1),



Рис. 3.1. Нефтедобывающая платформа Д-6

расположенной на расстоянии 22,5 км от Куршской косы и 8 км от морской границы с Литвой (глубина места около 30 м). Поскольку с 1993 г. в российском секторе юго-восточной Балтики и в Финском заливе не выполняются регулярные авиационные наблюдения нефтяного загрязнения (табл. 3.1, 3.2, см. с. 133; рис. 3.2, см. с. 134) (HELCOM Response..., 2009; *Kostianov*, 2012), то в состав программы мониторинга необходимо было включить спутниковый компонент.

В июне 2004 г. по просьбе ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» авторами был разработан и организован оперативный комплексный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики в качестве важного компонента контроля экологического состояния окружающей среды. В основу мониторинга был положен ежедневный оперативный прием и анализ разнообразной спутниковой информации (ASAR Envisat,

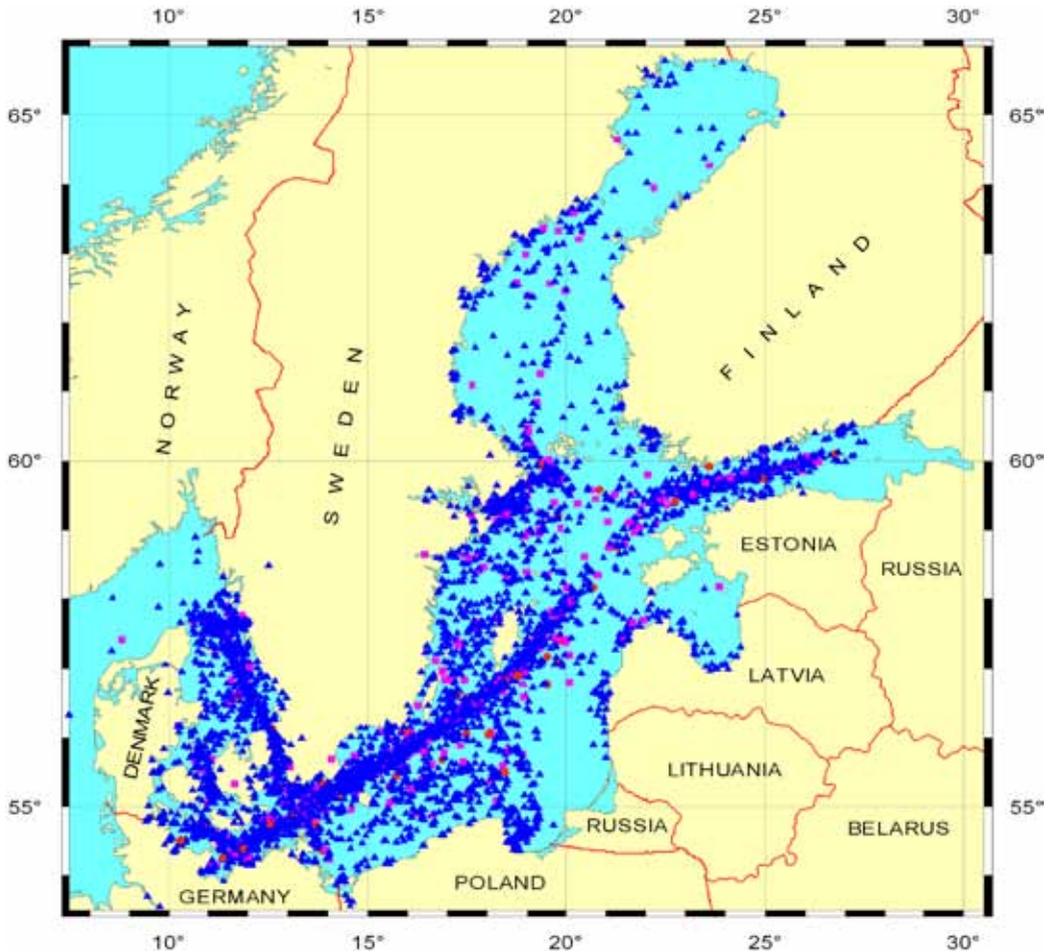
Таблица 3.1. Число нелегальных нефтяных загрязнений, обнаруженных в национальных водах Балтийского моря в 1988–2009 гг., отдельно по странам (HELCOM Response..., 2009)

Год	Страна								Всего	
	Дания	Эстония	Финляндия	Германия	Литва	Латвия	Польша	Россия		Швеция
1988	129			90			40	82	168	509
1989	159			139			69	184	212	763
1990	34			45		73	88		184	424
1991	46			85	8	20	14	3	197	373
1992	18	18		76	34	15	92	13	278	544
1993	17	7		43	28	6	110		250	461
1994	30	4		75			104		375	588
1995	48	3	26	55			72		445	649
1996	36		42	44			50		241	413
1997	38	3	104	34			25		234	438
1998	53	10	53	23		33	33		249	454
1999	87	33	63	72		18	18		197	488
2000	68	38	89	51		17	51		158	472
2001	93	11	107	51	0	6	24		98	390
2002	54	8	75	44		21	25		117	344
2003	37	4	40	60		14	39		84	278
2004	30	19	36	42	0	13	10		143	293
2005	28	24	32	34	0	5	5	2	94	224
2006	41	31	29	22	0	0	3		110	236
2007	43	58	29	30		2	15		61	238
2008	41	46	28	24		5	22		44	210
2009	34	20	16	15		1	27		65	178

Таблица 3.2. Число полето/часов контролирующей авиации, осуществленных странами ХЕЛКОМ в 1989–2009 гг. (HELCOM Response..., 2009)

Год	Страна									Всего
	Дания	Эстония	Финляндия	Германия	Литва	Латвия	Польша	Россия	Швеция	
1989				142			131	1618	1600	3491
1990	292			168		400	164		1600	2624
1991	199			129	348	408	140	629	1600	3453
1992	172			267	78	127	62	32	1700	2438
1993	153	40		201	133	24	49		1900	2500
1994	253	420		290		18	179		2038	3198
1995	225	420	355	291		8	301		1953	3553
1996	275	305	400	313	65	8	345		1763	3474
1997	209	284	355	288		64	291		2189	3680
1998	325	236	649	206		577	465		2544	5002
1999	416	268	603	286		320	375		2565	4833
2000	497	212	660	439	250	436	362		2374	5230
2001	463	161	567	466	300	412	187		2281	4837
2002	412	153	605	469		387	320		2518	4864
2003	510	201	615	446		414	228		2532	4946
2004	265	198	644	491	100	365	239		3231	5534
2005	251	178	625	549	54	384	141		3455	5638
2006	290	471	517	504	64	311	131		2842	5128
2007	271	410	529	598	41	343	380		1397	3969
2008	246	503	438	650		298	406		2063	4603
2009	240	371	351	638	66	61	561		2758	5046

SAR RADARSAT, AVHRR NOAA, MODIS Terra/Aqua, TOPEX/Poseidon, Jason-1) о нефтяном загрязнении поверхности моря, температуре поверхности моря (ТПМ), уровне моря, концентрации хлорофилла, цветении вод, содержании взвешенного вещества, ледяном покрове, мезомасштабной динамике вод, ветре и волнах на обширной акватории юго-восточной Балтики (*Kostianoy et al.*, 2004a–b; 2005a–c; 2006a, b; 2007b; *Лаврова* и др., 2004; 2005; *Костяной*, 2005; *Костяной* и др., 2005a, б; 2006; 2009; *Kostianoy*, 2005a, b; 2006a, b; 2008; *Lebedev et al.*, 2005; *Litovchenko et al.*, 2005a, b; *Lavrova et al.*, 2006a, b; 2008; *Kostianoy, Lavrova*, 2012). Кроме того, интерактивная численная модель Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI) использовалась для прогноза дрейфа всех больших нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных изображениях (РЛИ) юго-восточной части Балтийского моря, и виртуальных (модельных) нефтяных пятен с платформы Д-6.



Р и с. 3.2. Карта нефтяных пятен, обнаруженных в Балтийском море в 1989–2002 гг. (<http://www.helcom.fi>)

Такая обширная работа потребовала создания под руководством проф. А. Г. Костяного (ИО РАН) группы спутникового мониторинга, в которую вошли специалисты в различных областях дистанционного зондирования океана из космоса, океанологии, метеорологии и численного моделирования следующих научных организаций: Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН, Москва, Россия), Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН, Москва, Россия), Геофизический центр РАН (ГЦ РАН, Москва, Россия), Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (РНИИКП, Москва), Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО, Калининград, Россия), Морской гидрофизический институт НАНУ (МГИ НАНУ, Севастополь, Украина). Каждый специалист выполнял четко определенные функции и имел почасовой график работ, согласованный по времени с другими участ-

никами мониторинга. Особо важные функции работы комплексной системы мониторинга дублировались, так же как и системы связи и передачи данных. Следует отметить, что выполняемая коллективом работа коренным образом отличалась от «стандартной» научной работы, поскольку велась оперативно и круглосуточно, а степень ответственности за достоверность получаемых результатов имела международный уровень со всеми вытекающими последствиями для компании ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» и Российской Федерации.

В России подобной комплексной системы спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской акватории ранее не было. Впервые она была разработана авторами и успешно внедрена в компании ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» в 2004 г. Поскольку мониторинг осуществлялся 24 часа в сутки, 7 дней в неделю круглогодично, то можно считать, что была создана служба комплексного мониторинга экологического состояния Балтийского моря, работающая в оперативном режиме. Полных аналогов такой системы в мировой практике на тот момент также не существовало, а имеющиеся не обладали широким комплексным, мультисенсорным и мультиплатформным подходом к решению поставленных задач, поэтому имели известные недостатки. Аналогичные и даже превосходящие системы мониторинга возникали только в случаях крупных аварийных разливов нефти, например, в ситуации с танкером «Престиж» в ноябре 2002 г. или катастрофы на нефтяной платформе в Мексиканском заливе в апреле 2010 г., когда в работу включались десятки национальных и международных организаций. В отсутствие аварий постоянный спутниковый мониторинг каких-либо акваторий не проводился в оперативном режиме нигде.

Основные результаты оперативного комплексного спутникового мониторинга добычи нефти на Кравцовском нефтяном месторождении в юго-восточной части Балтийского моря в 2004–2005 гг. представлены ниже.

3.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА

Целью работы были: организация и проведение постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря для выявления случаев загрязнения морской акватории нефтепродуктами, определения районов загрязнения, возможных источников происхождения и путей вероятного переноса загрязнений. Основными задачами мониторинга стали:

- обнаружение нефтяных пятен вблизи платформы Д-6 и российских берегов, а также на акватории всей юго-восточной части Балтийского моря;
- идентификация вероятных источников загрязнения;
- прогноз направления и скорости дрейфа обнаруженных нефтяных пятен;
- систематизация и архивация комплексной информации об экологическом состоянии вод и гидрометеорологических условиях.

Для выполнения задач мониторинга необходимо было выявлять как пятна, образовавшиеся в российской акватории, так и те, которые были занесены извне, в результате трансграничного переноса течениями. Исходя из этого, мониторингу был подвергнут район месторождения и обширная прилегающая акватория юго-восточной Балтики.

Регулярный и оперативный мониторинг нефтяного загрязнения поверхности моря основывался на обработке и анализе радиолокационных изображений ASAR со всех пролетов спутника Envisat над акваторией юго-восточной части Балтийского моря (периодичность пролетов составляет 12–72 часа, охват одного снимка — 400×400 км, пространственное разрешение — 75 м на пиксел) и выборочно со спутника SAR RADARSAT в тех случаях, когда между снимками ASAR Envisat интервал достигал 72 ч (охват одного снимка 300×300 км, 25 м на пиксел). Цифровые изображения (файлы с данными) в соответствии с заключенным контрактом получались из Конгсбергских спутниковых служб (Kongsberg Satellite Services — KSAT, Тромсе, Норвегия) и обрабатывались в оперативном режиме, т. е. через 1–3 ч после пролета спутника над акваторией Балтики.

Интерпретация РЛИ с целью выделения нефтяных загрязнений на водной поверхности — чрезвычайно сложная задача в связи с наличием подобий нефтяных пятен на РЛИ, которые могут возникать в результате естественных процессов в океане (море) или атмосфере. Опыт предыдущих спутниковых мониторинговых систем, основанных только на анализе РЛИ, показывал, что существует большая вероятность так называемых «ложных тревог», когда слики (области выглаживания поверхностного волнения) на водной поверхности ошибочно интерпретировались как нефтяные пятна. Этим же недостатком обладают конечные продукты Конгсбергских спутниковых служб (Норвегия) и других аналогичных организаций-поставщиков обработанной спутниковой информации. Именно по этой причине специалисты мониторинговой группы не только сами обрабатывали и анализировали РЛИ, но и организовали получение и анализ обширной вспомогательной спутниковой, океанографической и метеорологической информации.

Для корректной интерпретации радиолокационных изображений, распознавания образов, выявления отличий сликов естественного происхождения от нефтяного и оценки скорости и направления дрейфа нефтяных пятен ежедневно собиралась и анализировалась обширная гидрометеорологическая информация из различных источников в Швеции, Германии, Польше, Финляндии, Эстонии, Латвии, Литве и России. Кроме того, использовались данные скаттерометра SeaWind с ИСЗ QuikSCAT и альтиметра Jason-1 для получения информации о скорости приводного ветра и высоте ветровых волн непосредственно на акватории моря.

Также для интерпретации радиолокационных изображений и прогноза дрейфа нефтяных пятен был организован прием, обработка и анализ всех информативных (безоблачных) инфракрасных (ИК) и оптических изображений со всех пролетов спутников серии AVHRR NOAA, а также MODIS Terra/Aqua. Пространственное разрешение этой информации составляло 250 м — 1 км. Спутниковая приемная станция Морского гидрофизического института в Севастополе использовалась для оперативного приема данных с AVHRR NOAA 24 часа в сутки, 7 дней в неделю. Эти данные обрабатывались, и на их основе строились карты температуры поверхности моря, оптических характеристик поверхности моря и поверхностных течений. Карты ТПМ, взвеси, концентрации хлорофилла и цветения вод (высокая концентрация сине-зеленых водорослей в поверхностном слое в летний период) позволяли выявить особенности мезо- и мелкомасштабной структуры и динамики вод Балтики, такие как: течения, вихри, диполи и мультиполю, струи, филаменты, речные плюмы и вытоки из Вислинского и Куршского заливов. Последовательность ежедневных ИК и оптичес-

ских изображений MODIS позволяли реконструировать реальные поля поверхностных течений (направление и скорость) с разрешением 250 м – 1 км, что чрезвычайно важно для прогноза направления и скорости дрейфа нефтяных пятен. Комбинация радиолокационных изображений ASAR Envisat и изображений MODIS позволяла понимать, почему пятна имеют ту или иную форму, а также прогнозировать их перенос мезомасштабными течениями.

На основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии рассчитывался прогноз дрейфа всех крупных нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках ASAR Envisat в юго-восточной Балтике и виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6. Модель Seatrack Web — это уникальная европейская модель, позволяющая рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф (и трансформацию) пятен различных нефтепродуктов на 48 ч с пространственным разрешением 3 мили, с учетом обновляющегося прогноза поля ветра (и ряда других метеорологических параметров) и течений каждые 3 часа (европейские оперативные модели HIRLAM и HIROMB). В настоящее время эта модель значительно улучшена по своим характеристикам и обладает дополнительными возможностями. Кроме того, именно она рекомендована ХЕЛКОМом всем балтийским странам для оперативного использования в случае обнаружения нефтяных загрязнений.

Таким образом, задача прогноза скорости и направления вероятного переноса пятен решалась комплексно с учетом анализа: ежедневной последовательности спутниковых РЛИ; состояния поверхности моря по спутниковым РЛИ; ежедневных спутниковых изображений поверхности моря в инфракрасном и оптическом диапазонах спектра; спутниковой информации о скорости приводного ветра; метеорологической информации; результатов численного моделирования на основе оперативной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии.

3.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Методология комплексного спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря и морских объектов обустройства Кравцовского нефтяного месторождения заключалась в следующем.

1. Планирование и предварительный заказ на весь текущий год радиолокационных съёмки у Европейского космического агентства — оператора спутника Envisat и Канадского космического агентства — оператора спутника RADARSAT — через Конгсбергские спутниковые службы, с которыми подписывался контракт на оперативную поставку радиолокационных изображений в виде исходных цифровых данных.

2. Оперативная загрузка данных PCA (радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR Envisat или SAR RADARSAT) с ftp-сервера KSAT. Данные представляют собой радиолокационные изображения района юго-восточной Балтики в координатах дальность-азимут, код продукта — ASA_WSM_1P. Основные характеристики изображений ASAR Envisat:

- размер 400×400 км;
- размер пиксела 75×75 м;

- размер файла 59 Мб;
- изображения выкладывались на сервер в пределах от 1 до 3 часов от времени съемки.

Основные характеристики изображений SAR RADARSAT:

- размер 300×300 км;
- размер пиксела 25×25 м;
- размер файла 200 Мб;
- изображения выкладывались на сервер в пределах от 1 до 3 часов от времени съемки.

3. Предварительная обработка изображений:

- координатная привязка по навигационным данным, содержащимся в служебной информации к каждому изображению, в результате чего оно представлялось в координатах долготы-широты;
- вырез фрагмента вокруг нефтяной платформы Д-6 размером 100 км по долготы и 150 км по широте;
- подбор в интерактивном режиме гистограммы для вырезанного фрагмента с целью наилучшего визуального восприятия основных информативных сигналов на морской поверхности;
- нанесение координатной сетки;
- для предварительной обработки данных использовалось специализированное программное обеспечение ENVI (ENvironment for Visualizing Images компании ITT Visual Information Solutions).

4. Тематическая обработка РЛИ. В первую очередь, выделялись слики, которые с наибольшей вероятностью могли быть соотнесены с нефтяными пятнами. Основными признаками для отнесения сликов к категории нефтяных пятен были:

- характерные формы нефтяных пятен;
- линейные размеры в пределах единиц км для обычных (неаварийных) разливов;
- резкие границы;
- наличие поблизости судов;
- отсутствие процессов и явлений в море или в атмосфере, которые могли приводить к появлению подобных нефтяных пятен.

Обширные и/или не имеющие резких границ темные области обычно связаны с ослаблением волнения по другим причинам — из-за слабого ветра (<2 м/с) или из-за океанических процессов (течения, подъем глубинных вод, цветение вод, наличие шуги или льда и т.д.). Внутри таких областей обнаружить нефтяные пятна, как правило, не представляется возможным. Также при скоростях ветра более 10–12 м/с обнаруживаемость нефтяных пятен резко снижается. Координаты обнаруженных нефтяных пятен фиксировались и в дальнейшем использовались для отслеживания их распространения на последующих снимках. Во всех случаях нефтяные пятна оконтуривались, наносились на координатную сетку, определялись их поперечные размеры и площадь. При наличии поблизости судов, которые могли являться источниками загрязнения, определялись их координаты.

Для повышения достоверности интерпретации РЛИ использовались данные приземного анализа скорости ветра, волнения, а также спутниковые карты ТПМ, взвеси, хлорофилла, цветения вод и льда. Данные по ветру и волнению позволяли оценить априорную возможность обнаружения пятен. Карты ТПМ в безоблачной ситуации несут информацию о структуре течений, которая при определённых условиях может наблюдаться на изображении РСА и по которой можно прогнозировать направление распространения пятен.

При работе в штатном режиме (т.е. когда ситуация с нефтяными пятнами не выходила за пределы фоновой) информация по результатам интерпретации РСА-изображений поставлялась в течение суток после ее появления на сервере KSAT и использовалась при составлении еженедельного отчёта, передаваемого в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть». В случае обнаружения аварийных, значительных по площади нефтяных пятен, пятен у берегов России или таких, которые могли быть соотнесены с действительным или мнимым выбросом с нефтяной платформы Д-6, включался режим экстренного мониторинга с выдачей в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» подробной интерпретации каждого из снимков (с учетом анализа вспомогательной спутниковой, океанографической и метеорологической информации, а также численного моделирования дрейфа пятна на 48 часов вперед) в максимально сжатые сроки (в пределах трех часов после получения снимка от KSAT).

5. Заказ, прием, обработка и поставка спутниковых данных с радиометров AVHRR NOAA, MODIS Terra/Aqua в оптическом и инфракрасном диапазонах проходил в следующей последовательности:

- по данным международных метеорологических Интернет-порталов Всемирной Метеорологической Организации и других организаций (<http://www.wmo.ch>, <http://grads.iges.org> и др.) оценивался прогноз метеообстановки над интересующим районом за сутки до пролета спутника и потенциальный объем возможных спутниковых данных;
- на спутниковой приемной станции МГИ НАНУ (Севастополь, Украина) осуществлялся регулярный круглосуточный прием изображений AVHRR с американских спутников серии NOAA (NOAA-12, -15, -16, -17 с разрешением 1,1 км), что при благоприятных погодных условиях обеспечивало получение карт ТПМ и оптических характеристик воды каждые 4 часа в течение суток;
- в случае невозможности приема снимков из-за особенностей расположения приемной антенны, аналогичные исходные данные брались с сервера Лаборатории информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН (<http://smis.iki.rssi.ru>), либо заказывались в Comprehensive Large Array-data Stewardship System (<http://www.class.noaa.gov>);
- для первичной обработки поступающих данных в МГИ НАНУ был разработан автоматизированный комплекс, позволяющий оперативно получать на основе исходных снимков карты ТПМ и оптических характеристик водной поверхности (взвеси, хлорофилла, цветения вод, восходящего излучения). Будучи приведенными к единой географической сетке, последовательные снимки позволяли оценивать структуру течений в интересующем районе и направление движения водных масс по анализу смещения характерных неоднородностей на поверхности моря. По возможности, на основе последовательных безоблачных снимков строились анимации, по которым можно было оценить скорости

течений и построить вектора перемещений характерных структур на поверхности моря. Методика базировалась на выделении структурных особенностей поля температуры (или оптических свойств) и отслеживании их перемещения на последовательных изображениях с расчетом векторов скоростей. Скорость рассчитывалась как dL/dt , где dL — определяемое по последовательным снимкам пространственное смещение особенностей поля температуры (оптических свойств), dt — разница во времени получения изображений. Поскольку перемещение нефтяных загрязнений определяется на 2/3 ветром и на 1/3 течениями, то основная задача заключалась в получении детальной информации о поле ветра над акваторией моря и регулярных данных о мезо- и мелкомасштабной (порядка 1–10 км) структуре течений в исследуемом районе. Решение этой задачи позволяло отслеживать и прогнозировать возможное распространение загрязнений (не фиксируя сами загрязнения), а в ряде случаев (периферия солнечного блика) и детектировать загрязнения по изменению шероховатости морской поверхности;

- для более детального наблюдения района мониторинга привлекались оптические снимки высокого разрешения (до 250 м) и инфракрасные снимки (1 км) со спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua. Принятые в мировых спутниковых центрах изображения MODIS выставлялись на сайтах NASA в течение суток после пролета спутника (в настоящее время — через несколько часов). Доступ к ним осуществлялся через главный портал архива GSFC DAAC (<http://daac.gsfc.nasa.gov>). Поскольку объем исходных снимков был очень велик, то предварительно оценивалась возможность получения полезной информации на основе уже принятых и обработанных снимков AVHRR NOAA, близких по времени к снимкам MODIS, и лишь после этого принималось решение о заказе и перекачивании исходного файла. Для быстрой оценки качества и степени полезности снимка также просматривались ftp-архивы предварительных изображений MODIS (<ftp://g0dps01u.ecs.nasa.gov>);
- обработка исходных снимков MODIS производилась с использованием комплексов SeaDAS (<http://seadas.gsfc.nasa.gov>) и Sphynx, работающих в среде Linux. В процессе обработки строились карты высокого разрешения либо на основе наиболее чувствительных к свойствам воды каналов, либо путем композиции трех оптических каналов в единую цветовую плоскость. В качестве дополнительной информации использовались карты концентрации хлорофилла и восходящего излучения, которые могли быть рассчитаны на основе снимков километрового разрешения со сканеров MODIS и SeaWiFS с помощью комплекса SeaDAS. Исходные снимки также заказывались в архивах DAAC;
- рассчитанные поля физических характеристик, а также карты направления и скорости течений выдавались в стандартных графических форматах.

6. На основе интерактивной численной модели Seatrack Web, SMNI ежедневно рассчитывался прогноз дрейфа и трансформации нефтяного пятна на 48 часов с шагом 3 ч в случае аварийного разлива нефти объемом 10 м^3 на платформе Д-6. Кроме положения пятна, рассчитывалось его состояние на каждые 3 часа — координаты, размер, скорость и направление дрейфа, объем смеси с водой, процент испарившейся-

ся, диспергированной, осадившейся нефти, воды в смеси. Этот ежедневный прогноз позволял заранее планировать действия по ликвидации нефтяного загрязнения в результате потенциально возможной аварии на Д-6 и трубопроводе. Кроме того, модель использовалась для прогноза дрейфа всех пятен, обнаруженных в непосредственной близости от платформы Д-6 или российских берегов на радиолокационных снимках акватории юго-восточной Балтики.

7. Одновременно проводился оперативный сбор текущей метеорологической информации из зарубежных (Германия, Польша, Швеция, Финляндия, Эстония, Латвия, Литва) и отечественных источников по акватории юго-восточной части Балтийского моря и метеостанции Клайпеды: синоптические карты, облачность, атмосферное давление, температура воздуха, влажность, осадки, поле ветра (скорость и направление, прогноз), поле поверхностных волн (скорость и направление, прогноз); текущей океанографической информации: поле поверхностных течений (скорость и направление, прогноз), распределение хлорофилла в поверхностном слое, отчеты гидрологических и гидрохимических работ в море, информация о цветении водорослей и пр. На основе данных скаттерометра SeaWind со спутника QuikSCAT делался расчет вдоль трека и построение карт модуля скорости приводного ветра непосредственно на акватории моря. Вся эта информация использовалась при анализе радиолокационных снимков, для получения прогноза гидрометеорологических условий на ближайшие дни, для сравнения и возможной корректировки модельных расчетов дрейфа нефтяных пятен.

8. Еженедельно подготавливался и передавался в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» отчет о проделанной работе — «Морской бюллетень» с иллюстрированным обзором состояния юго-восточной части Балтийского моря, составленным на основе результатов комплексного спутникового мониторинга за прошедшую неделю.

9. Вся спутниковая, метеорологическая и океанографическая информация архивировалась на CD-диске (табл. 3.3) и передавалась в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» вместе с годовым отчетом.

Т а б л и ц а 3.3. Структура ежемесячного электронного архива данных на CD-диске

Директория	Содержание
Bulletin	Тексты «Морских бюллетеней» за отчетный период
Algal-report	Отчеты о цветении водорослей в Балтике
Chl	Карты содержания хлорофилла
Currents	Карты течений в Балтике
Meteo	Синоптические карты погоды в Европе и метеоинформация по Клайпедо
Meteo-Poland	Метеоинформация по району платформы Д-6 с прогнозом на 2 суток
Meteo-Radar	Композитные изображения облачности над Балтикой, полученные по данным 23 метеорологических радаров Швеции, Финляндии и Норвегии
Meteosat	Спутниковые снимки Европы в оптическом диапазоне (Meteosat, 4 снимка в сутки)

Директория	Содержание
SAR	Радиолокационные изображения Балтики с экспертным анализом нефтяного загрязнения акватории
Satimage	\Animation — анимации спутниковых изображений. \Currents — поле течений, восстановленное по спутниковым изображениям Спутниковые изображения Балтики и ее юго-восточной части в ИК- и оптическом диапазонах спектра с различных спутников
Sat-wind	Поле ветра по данным спутника QuikSCAT
Seatrack	Карты с ежедневным прогнозом на 48 часов распространения нефтяного пятна (траектория движения) в случае аварийного разлива нефти на платформе Д-6, полученные на основе оперативной численной интерактивной модели дрейфа нефтяных пятен в Балтийском море Шведского института метеорологии и гидрологии (Seatrack Web, SMHI). Информация о состоянии и трансформации пятен во время дрейфа
SMHI-cruise-reports	Отчеты по гидрологическим работам в Балтике Шведского института метеорологии и гидрологии
SST	Карты температуры поверхности Балтийского моря
Wave	Поле ветровых волн в Южной Балтике
Wind	Поле ветра в Южной Балтике

10. По итогам мониторинга за год подготавливался и выпускался отчет компании ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» в виде печатного цветного иллюстрированного буклета на русском и английском языках (*Костяной и др., 2005б*). Отчет в виде pdf-файла доступен на веб-сайтах компаний ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» (http://www.lukoil-kmn.com/monitoring_space.phtml) и ОАО «ЛУКОЙЛ» (http://www.lukoil.ru/static_6_5id_2135_.html).

Рассмотрим преимущества и недостатки методов, использованных для мониторинга нефтяного загрязнения юго-восточной Балтики.

Преимущества методов

Для радиолокационных изображений SAR/ASAR:

- уникальность метода идентификации пятен нефтепродуктов, обусловленная тем, что из всех известных в настоящее время датчиков только РСА обладает абсолютной чувствительностью к шероховатости морской поверхности в сантиметровом диапазоне спектра волн, который в наибольшей степени подавляется нефтяными плёнками);
- независимость от облачности и освещенности (день/ночь);
- большой размер охвата кадра — 400×400 км;
- пространственное разрешение 75 м на пиксел для изображений ASAR Envisat и 25 м на пиксел для SAR RADARSAT позволяет обнаруживать не только пятна, но и суда;
- повторяемость съемки — от 12 до 72 часов.

Для данных ИК- и оптического диапазонов:

- стандартный метод идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур;
- большая полоса обзора спутника (ширина кадра) — 3000 км;
- пространственное разрешение — 0,25–1,1 км;
- повторяемость съемки — 3–6 ч.

Для альтиметрических данных (уровень, скорость ветра, высота волн):

- измерение аномалий уровня моря, скорости ветра и высоты ветровых волн непосредственно на акватории моря;
- не зависит от облачности и освещенности (день/ночь);
- глобальное покрытие земного шара;
- пространственное разрешение — 5 км.

Модель Seatrack Web (в версии 2011 г.). Уникальная модель Шведского института метеорологии и гидрологии, позволяет:

- рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф (и трансформацию) пятен различных нефтепродуктов на 5 суток вперед с учетом обновляющегося прогноза поля ветра и течений каждые 3 часа;
- восстанавливать историю дрейфа пятен до 30 суток назад;
- рассчитывать дрейф предметов на поверхности моря: лодок, шлюпок, яхт, человека в воде, в том числе в спасательном жилете, бев и пр.;
- выявлять случаи как разового сброса, так и продолжительной утечки, при этом задаются либо объем сброса, либо расход и время утечки;
- выполнять визуализацию дрейфа пятен (окончательное положение пятна, траектория дрейфа — линия, траектория дрейфа и размыва пятна — «факел»);
- рассчитывать на каждый час состояние пятна (координаты, размеры, скорость и направление дрейфа, объем смеси с водой, процент испарившейся, диспергированной и осадившейся нефти, воды).

Модель Seatrack Web (в версии 2011 г.):

- не зависит от погодных условий;
- обеспечивает разрешение (шаг) по времени — 3 часа и пространственное разрешение — 1 морская миля;
- сопряжена с системой автоматической идентификации судов на Балтике, благодаря чему имеется возможность идентификации виновников нефтяного загрязнения даже на значительном расстоянии судна от нефтяного пятна.

Ограничения методов**Для радиолокационных изображений SAR/ASAR:**

- ограничения по скорости ветра в диапазоне 2–10 м/с (согласно статистике, ветер в районе платформы Д-6 находился в указанном диапазоне в среднем в 80 % случаев);
- интервал при съемке в режиме широкого захвата может достигать трех суток;
- в ряде случаев сигнатуры нефтяных пятен мало отличаются от зон пониженного радиолокационного сигнала, вызванных другими причинами, — естествен-

ными плёнками, локальным ослаблением ветра, внутренними волнами, апвеллингом, цветением вод, наличием шуги или льда.

Для данных ИК- и оптического диапазонов:

- наблюдение не может вестись при сплошной облачности над исследуемым районом;
- необходимо присутствие трассера (градиентов температуры и оптических свойств);
- для оптического диапазона — необходим дневной свет.

Для альтиметрических данных (уровень, скорость ветра, высота волн):

- зондирование может выполняться только вдоль фиксированных треков;
- большая периодичность зондирования — 10 суток;
- не дает направления ветра и волн.

Модель Seatrack Web:

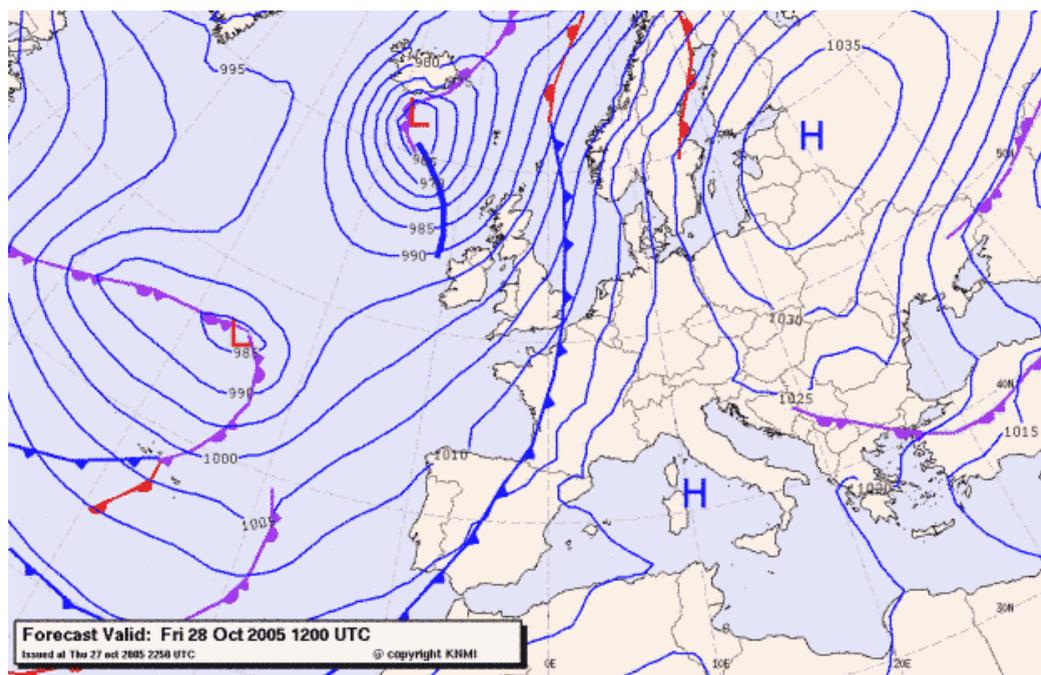
- не всегда полностью воспроизводит особенности мезомасштабной и мелкомасштабной динамики вод.

Тем не менее комплексный подход в использовании различных методик и данных (включая анализ океанографических и метеорологических данных) позволяет минимизировать естественные ограничения, имеющиеся у каждого подхода, метода и типа используемых данных.

3.3. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Для повышения достоверности интерпретации РЛИ морской поверхности, а также с целью проведения комплексного мониторинга гидрометеорологических условий в юго-восточной Балтике была организована система сбора гидрометеорологической информации. Источниками информации были оперативные европейские и российские центры данных, существующие, как правило, в структурах национальных гидрометеорологических служб или являющиеся частью научно-исследовательских институтов.

Для оценки общей макросиноптической ситуации над юго-восточной Балтикой использовались карты анализов и прогнозов барической топографии Королевского метеорологического института Нидерландов (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), метеорологическая модель HIRLAM) (рис. 3.3, см. с. 145). Анализ перемещения атмосферных циклонов, антициклонов, фронтов и других барических образований позволяет охарактеризовать как гидрометеорологические условия в исследуемом районе, так и условия, в которых были получены РЛИ морской поверхности. Кроме того, с помощью прогнозов синоптических условий можно заранее оценить возможность получения информативных спутниковых снимков поверхности моря в видимом и ИК-диапазонах на момент получения очередного РЛИ со спутника.



Р и с . 3.3. Синоптическая карта Европы на 28 октября 2005 г. (12:00 UTC) (© KNMI)

Для количественной оценки метеорологических условий в районе платформы Д-6 и для их сравнения со средними многолетними условиями использовались данные НПЦ «Мэп Мейкер» (ФОБОС) с метеостанции в Клайпеде (Литва). Набор значений метеорологических характеристик включал в себя наблюдения за температурой воздуха, атмосферным давлением, влажностью, скоростью и направлением ветра, облачностью и за явлениями погоды с интервалом 3 часа. Получаемые данные позволяли отслеживать динамику метеорологических процессов вблизи платформы, а также получать еженедельные статистические характеристики метеоусловий. Кроме данных ФОБОС по Клайпеде, использовались метеограммы, содержащие трехсуточный ежечасный прогноз метеорологических условий в районе платформы Д-6 (рис. 3.4, см. с. 146), подготавливаемые в Междисциплинарном центре математического и компьютерного моделирования Варшавского университета (Польша).

Интерпретация РЛИ морской поверхности в значительной степени зависит от наличия информации о процессах, происходящих как в приводном слое атмосферы, так и в поверхностном слое моря. К таким процессам можно отнести замерзание поверхности моря, вариации поля приводного ветра, конвекция в атмосфере, интенсивность атмосферных осадков, высота и направление волнения, развитие цианобактерий в фотическом слое моря (цветение моря), изменения концентрации хлорофилла-*a* на его поверхности. Кроме интерпретации РЛИ, эта информация необходима для анализа мезомасштабной динамики вод на поверхности моря и для интерпретации модельных расчетов дрейфа нефтяных пятен.

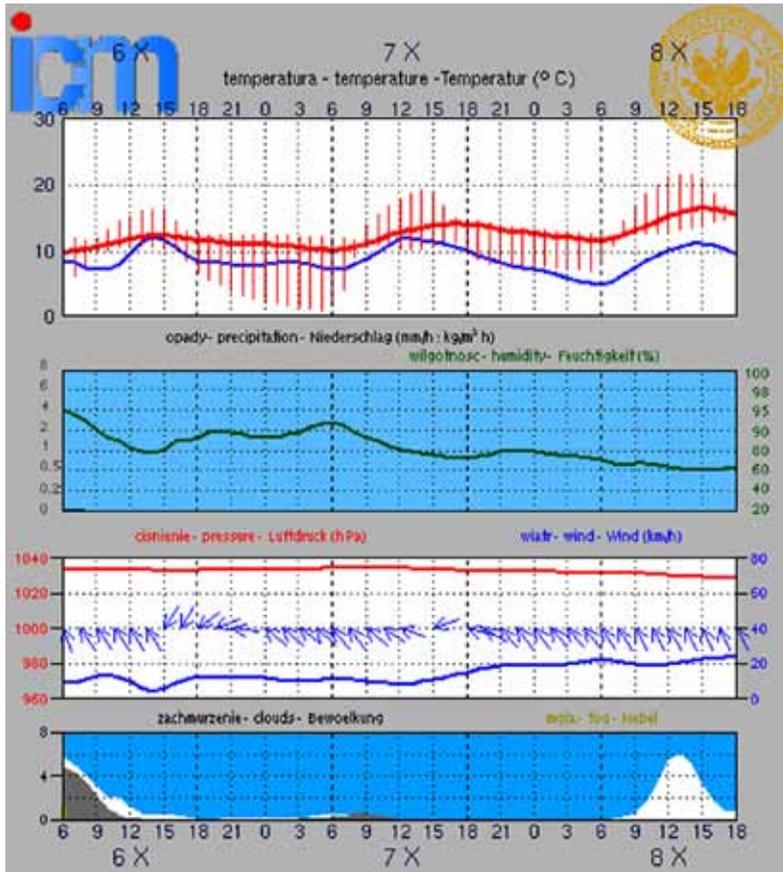


Рис. 3.4. Прогноз метеоусловий (температура воздуха, интенсивность осадков, влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра, облачность и туман) в районе платформы Д-6 и Куршской косы на 6–8 октября 2005 г. по данным Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета (Польша)

Для мониторинга ледовых условий в холодный период года использовались карты ледовой обстановки Балтийского моря Шведского института метеорологии и гидрологии, выпускаемые два раза в неделю (рис. 3.5, см. с. 147). Карты содержат информацию о границах распространения льда, концентрации и типе ледяных полей, толщине льда и температуре поверхности моря.

Поля прогнозов значений скорости и направления ветра над поверхностью моря использовались для выявления штилевых или штормовых зон, участков атмосферных фронтов и оценки силы и направления ветра при интерпретации РЛИ. Кроме того, информация о направлении ветра применялась для определения участков ветровой тени вблизи побережья. Карты распределения силы и направления ветра в узлах регулярной сетки предоставлялись компанией Windfinder GbR (Германия) (рис. 3.6, см. с. 148). Из этого же источника использовались карты прогнозов распределения высоты и направления волн (рис. 3.7, см. с. 149).

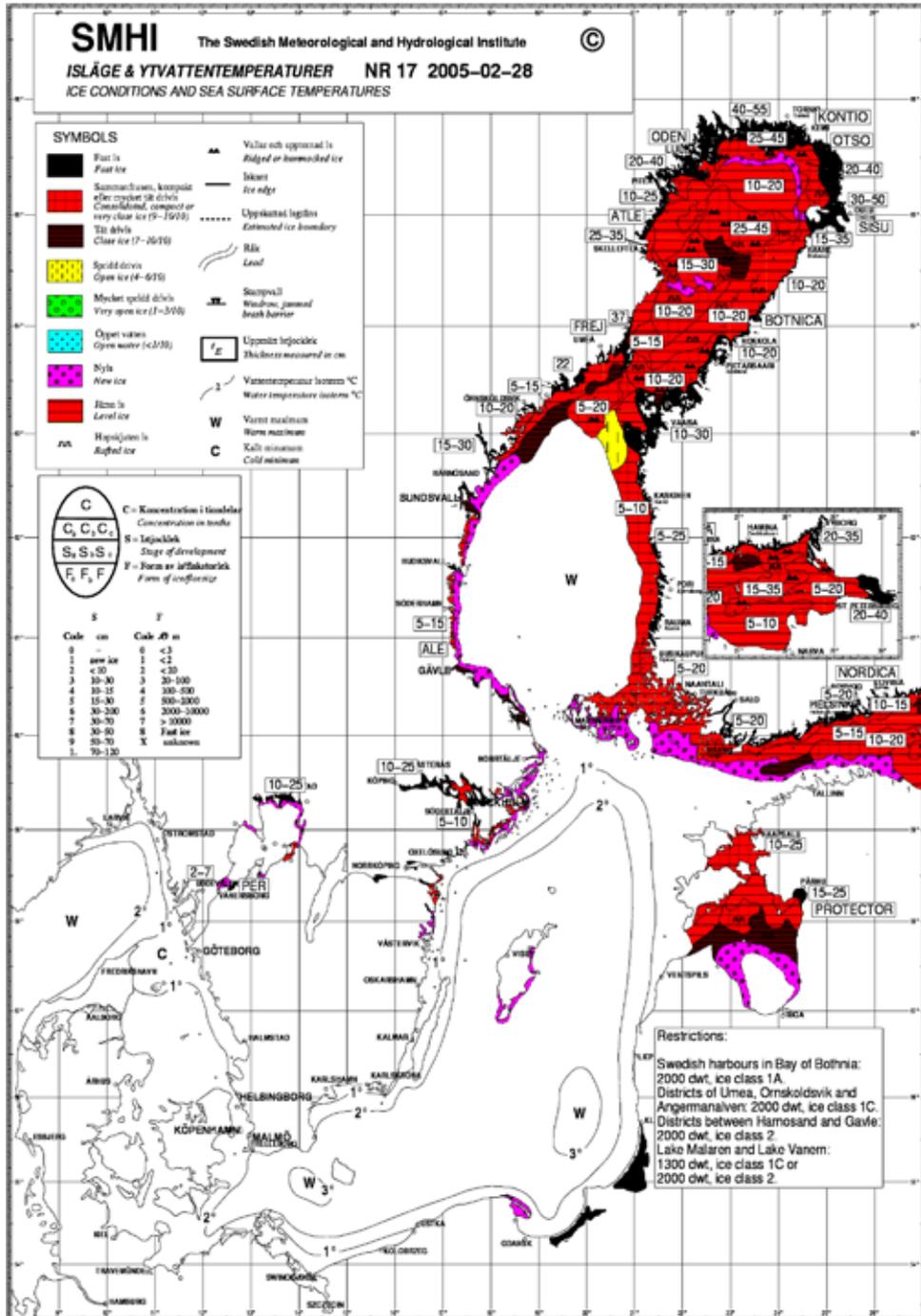


Рис. 3.5. Карта ледовых условий и ТПМ Балтийского моря 28 февраля 2005 г. по данным Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI)

wind at 28.2.2005, 23:00 local time (28.2.2005, 21:00 UTC)

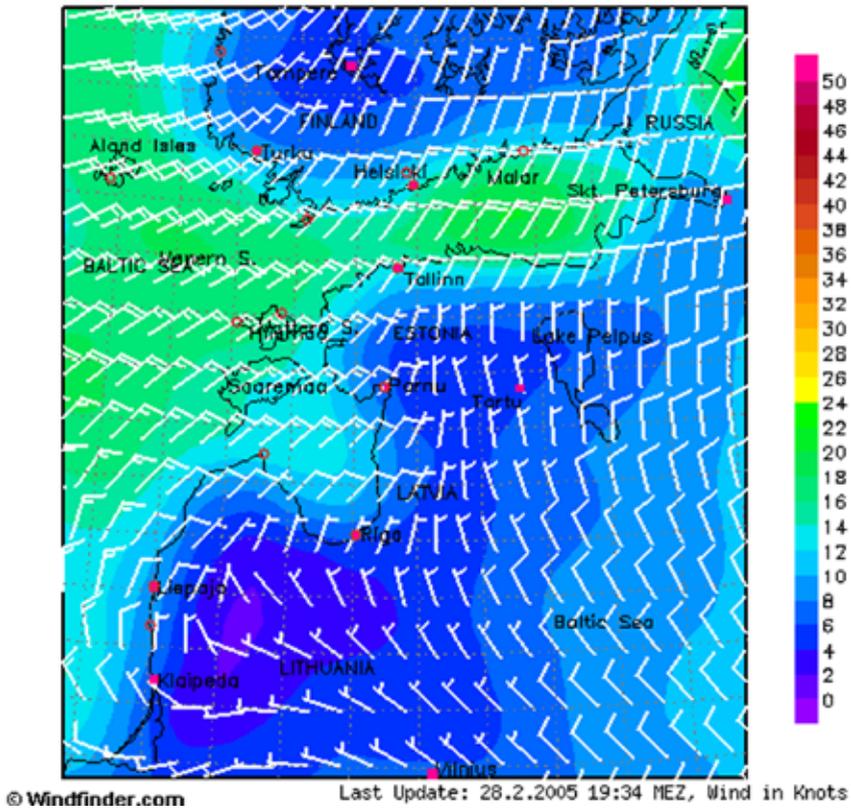
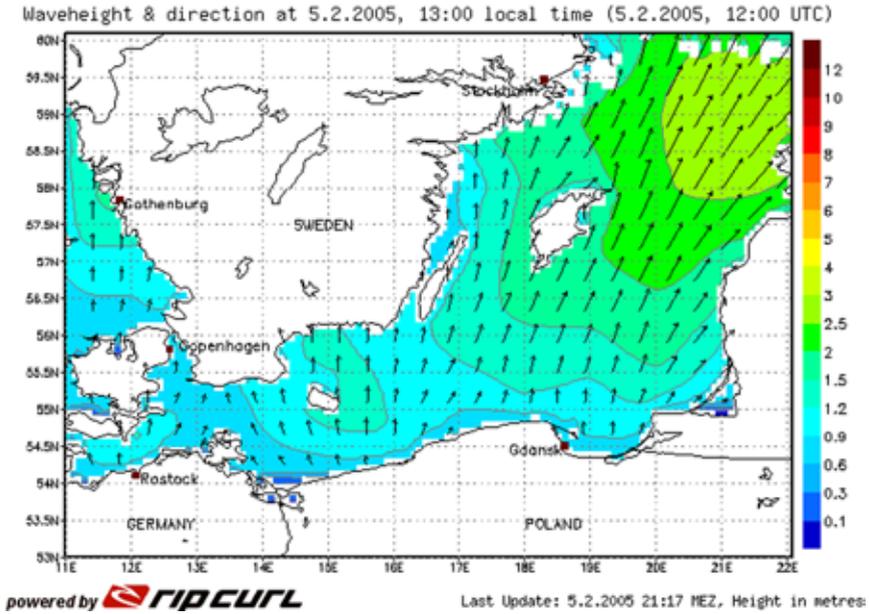


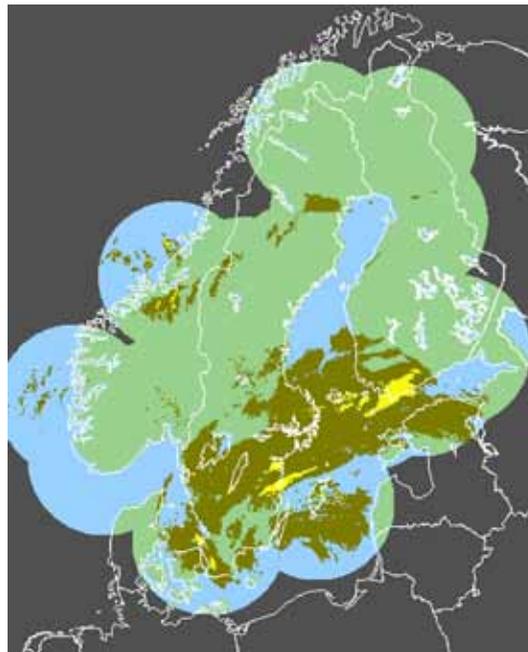
Рис. 3.6. Поле ветра в узлах регулярной сетки над восточной Балтикой 28 февраля 2005 г. по данным Windfinder GbR (Германия)

С целью локализации участков интенсивных атмосферных осадков, отражающихся на РЛИ морской поверхности, использовались данные метеорадаров, расположенных на побережье Балтийского моря. Композиционные изображения распределения интенсивности осадков предоставлялись Шведским институтом метеорологии и гидрологии с двухчасовым интервалом (рис. 3.8, см. с. 149) в рамках совместной европейской программы NORDRAD. Всего в работе системы задействовано 30 метеорадаров, расположенных в Швеции, Норвегии, Финляндии, Дании и Эстонии. Программа NORDRAD является результатом сотрудничества Шведского института метеорологии и гидрологии, Норвежского метеорологического института, Финского метеорологического института, Эстонского института метеорологии и гидрологии и Датского метеорологического института.

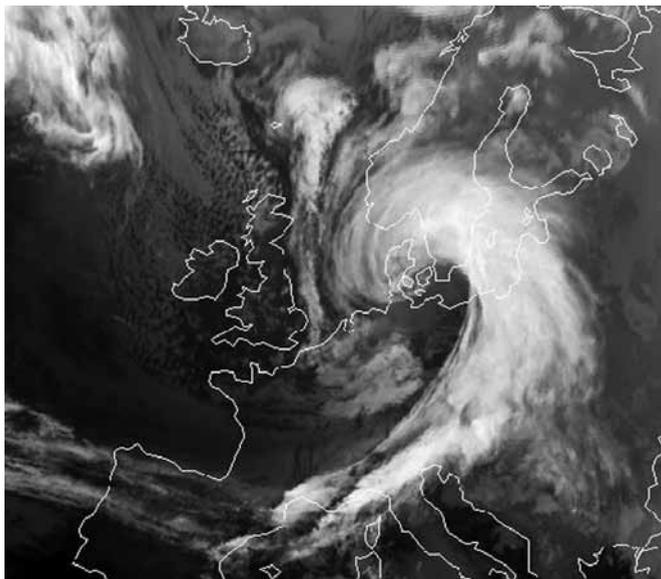
Дополнительную информацию о зонах интенсивных атмосферных осадков дают спутниковые снимки облачности в ИК и оптическом диапазоне, получаемые со спутника METEOSAT (рис. 3.9, см. с. 150) шесть раз в сутки. Кроме того, снимки облачности позволяют оценить возможность получения информативных спутниковых снимков морской поверхности в видимом и ИК-диапазонах.



Р и с . 3.7. Высота и направление волн в узлах регулярной сетки в Балтийском море 5 февраля 2005 г. по данным Windfinder GbR (Германия)



Р и с . 3.8. Композиционное изображение распределения интенсивности осадков над Балтийским морем 13 февраля 2005 г. (12:00 GMT) по данным метеорадаров



Р и с . 3.9. Спутниковый снимок Европейского региона 12 февраля 2005 г. (18:00 GMT) (МЕТЕОСАТ, ИК-диапазон) (© SMHI)

Комплексный мониторинг юго-восточной части Балтийского моря также включал в себя наблюдения за состоянием эвтрофикации поверхностного слоя или за цветением моря. Скопления водорослей в период интенсивного летнего цветения могут создавать сликовые области на поверхности моря, а также являются естественными трассерами, отражающими особенности мезомасштабной динамики вод, которые можно идентифицировать по спутниковым снимкам спектрорадиометра MODIS. С целью мониторинга процессов, связанных с эвтрофикацией поверхностного слоя моря, использовались недельные композиционные карты концентрации хлорофилла-*a* на поверхности моря Федерального агентства по судоходству и гидрографии Германии (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) (рис. 3.10, см. с. 151), подготавливаемые на основе спутниковых снимков спектрометра MERIS Envisat. Пространственное разрешение композиционных карт составляла 2×2 км и позволяла выделять участки наибольшей концентрации фитопланктона.

Кроме данных о концентрации хлорофилла-*a* на поверхности моря, для мониторинга процесса цветения водорослей использовалась оперативная информация Системы наблюдения за водорослями Балтийского моря (The Baltic Algal Watch System) при Шведском институте метеорологии и гидрологии. Ежедневные карты распределения участков цветения водорослей с классификацией интенсивности цветения подготавливались на основе спутниковых данных радиометра AVHRR NOAA и спектрорадиометра MODIS Terra/Aqua (рис. 3.11, см. с. 151).

Весь комплекс получаемой информации позволял достаточно эффективно оценивать гидрометеорологические условия в юго-восточной части Балтийского моря как с целью мониторинга процессов, происходящих в море и атмосфере, так и при дешифрировании РЛИ морской поверхности.

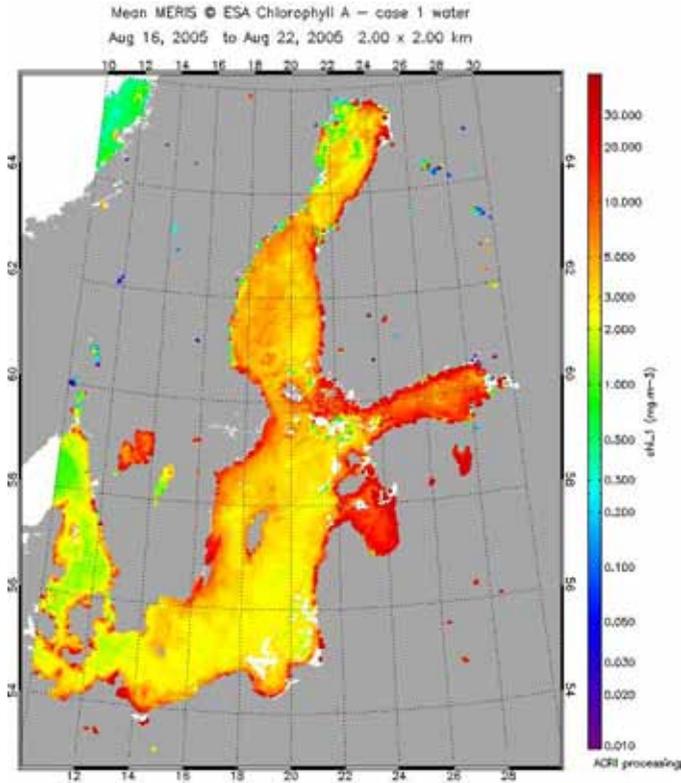


Рис. 3.10. Средняя концентрация хлорофилла-а на поверхности моря 16 августа 2005 г. по данным спутниковых снимков MERIS Envisat

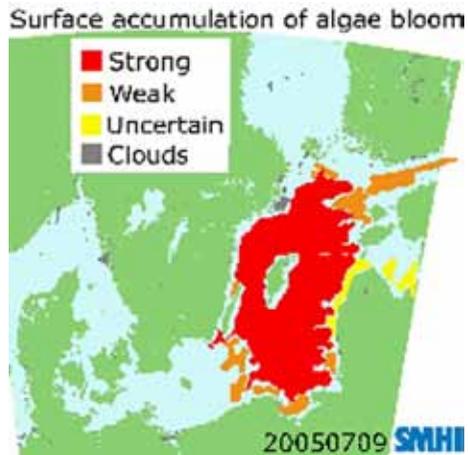


Рис. 3.11. Карта распределения участков цветения водорослей с классификацией интенсивности цветения по данным AVHRR NOAA и MODIS Terra/Aqua 9 июля 2005 г. (© SMHI)

3.4. СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СКОРОСТИ ВЕТРА И ВЫСОТЕ ВОЛН

Для корректной интерпретации радиолокационных изображений необходима дополнительная информация о скорости ветра и волнении. В первую очередь это обусловлено тем, что выглаженные области морской поверхности, не имеющие резких границ на РЛИ, могут быть связаны с ослаблением волнения из-за слабого ветра, скорость которого менее 2 м/с. Внутри таких областей обнаружить нефтяные пятна, как правило, не представляется возможным. Во-вторых, при скоростях ветра более 10–12 м/с возможность обнаружения нефтяных пятен на РЛИ также резко снижается. Для того чтобы избежать этих трудностей, необходима информация о скорости приводного ветра и высоте волн, полученная непосредственно в акватории моря.

Данных с береговых метеостанций и стационарных платформ, расположенных на акватории Балтийского моря, к сожалению, не всегда достаточно для анализа РЛИ. Так, например, из восьми платформ, на которых Шведский институт метеорологии и гидрологии проводит регулярные ежечасные измерения параметров ветровых волн (высоты и направления распространения) в Балтийском море только одна (“Southern Baltic”) расположена в районе, наиболее близко расположенном к акватории мониторинга. Кроме того, эти данные могут содержать пробелы (<http://www.smhi.se//weather/havsvag/ocwave.htm>).

По этой причине было принято решение использовать в качестве дополнительной информации о скорости ветра данные скаттерометрии SeaWind со спутника QuikSCAT, а для определения высоты ветровых волн — данные альтиметрических измерений со спутника Jason-1 и результаты расчетов поля ветровых волн по модели WW3 Метеорологического и океанографического вычислительного центра ВМС США (The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, FNMOC, USA).

Основные преимущества зондирования подстилающей поверхности в микроволновом диапазоне связаны с высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу, поэтому наблюдения могут проводиться в любое время суток, практически в любую погоду, при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Это справедливо не только для спутниковой альтиметрии, но и для других активных методов дистанционного зондирования.

Для скаттерометра SeaWind, установленного на спутнике QuikSCAT, пространственное разрешение составляет 25 км. Скорость ветра в диапазоне 3–20 м/с рассчитывается с точностью 2 м/с и 10 % для скоростей выше 20 м/с, а его направление — с точностью 20° для интервала 3–20 м/с (QuikSCAT, 2001).

Данные скаттерометрии спутника QuikSCAT позволяют анализировать поле приводного ветра на акватории Балтийского моря дважды в сутки примерно с 3 до 5 часов (утренний пролет) и с 16 до 19 часов (вечерний пролет). Время пролета спутника над акваторией Балтийского моря составляет не более 3 секунд. Используя предварительные данные Центра по физической океанографии Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (PODAAC, JPL), которые поступают в открытый доступ примерно через 6 часов после измерений, можно проводить спутниковый мониторинг поля приводного ветра Балтийского моря в режиме близком к реальному времени.

При этом следует учитывать следующие моменты. Во-первых, из-за достаточно низкого пространственного разрешения (25 км) и низкой точности пришлось отказаться от расчетов направления ветра и ограничиться только его скоростью. Во-вторых, алгоритм расчета скорости ветра по данным скаттерометра SeaWind предназначен для открытого океана, поэтому необходима дополнительная привязка результатов расчета к конкретной метеорологической ситуации на акватории Балтийского моря, сложившейся на момент измерений. Поэтому для анализа спутниковой информации необходимо привлечь дополнительные данные с береговых метеостанций.

Для построения таких композиционных карт скорости ветра на регулярной сетке в четверть градуса в качестве дополнительной информации использовались данные о скорости и направлении ветра с 16 метеостанций аэродромного базирования (табл. 3.4), расположенных вокруг юго-восточной части Балтийского моря. Данные с этих метеостанций поступали со скважностью от 30 минут до 1 часа и были доступны примерно через 3 часа после проведения измерений.

Т а б л и ц а 3.4. Список метеостанции, информация с которых использовалась для обработки данных со скаттерометра SeaWind ИСЗ QuikSCAT

Метеостанции		Координаты	
Название	Страна	Широта (с. ш.)	Долгота (в. д.)
Рённе (Roenne)	Дания	55° 04'	14° 45'
Херингсдорф (Heringsdorf)	Германия	53° 53'	14° 09'
Гданьск (Gdansk)	Польша	54° 23'	18° 28'
Калининград	Россия	54° 42'	20° 37'
Клайпеда (Klaipeda)	Литва	55° 44'	21° 04'
Паланга (Palanga)	Литва	55° 58'	21° 05'
Лиепая (Liepaja)	Латвия	56° 29'	21° 01'
Вентспилс (Ventspils)	Латвия	57° 24'	21° 32'
Рига (Riga)	Латвия	56° 55'	23° 58'
Курессааре (Kuressaare)	Эстония	58° 14'	22° 31'
Пярну (Pärnu)	Эстония	58° 25'	24° 28'
Кальмар (Kalmar)	Швеция	56° 44'	16° 18'
Кристианстад (Kristianstad)	Швеция	55° 55'	14° 05'
Норрчепинг (Norrköping)	Швеция	58° 35'	16° 15'
Роннебю (Ronneby)	Швеция	56° 16'	15° 17'
Висбю (Visby)	Швеция	57° 40'	18° 21'

Сравним поля приводного ветра, построенные для утреннего и вечернего пролетов спутника QuikSCAT на 11 августа 2004 г. (рис. 3.12, см. с. 154 и 3.13, см. с. 155). Погодные условия в юго-восточной части Балтийского моря в этот период определялись областью высокого давления, установившейся в середине первой декады августа.

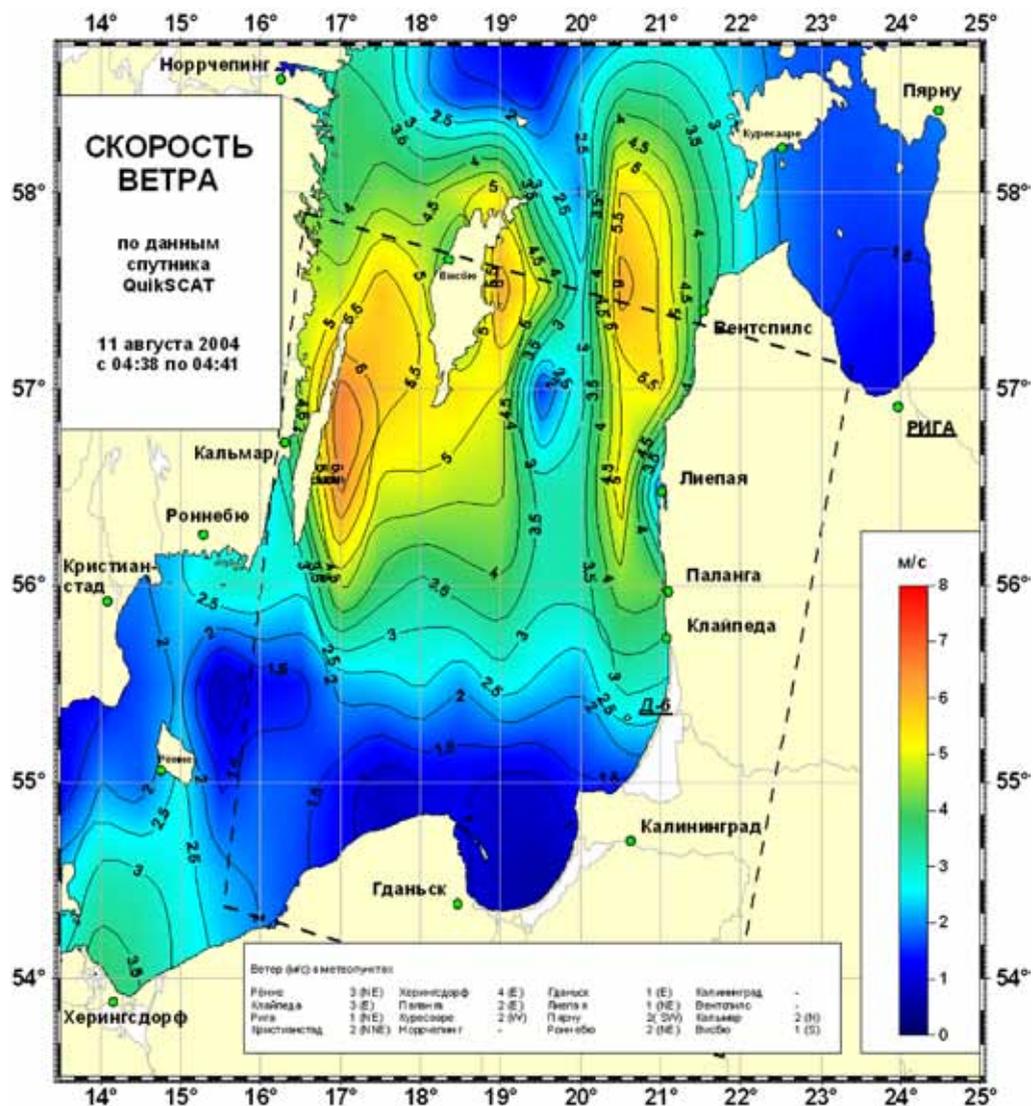


Рис. 3.12. Скорость приводного ветра по данным измерений скаттерометра SeaWind ИСЗ QuikSCAT на 11 августа 2004 г. за временной интервал 04:38–04:41 GMT (утренний пролет). Штриховой линией показаны границы РЛИ спутника Envisat на 11 августа 2004 г. 09:06:01 GMT

В районе платформы Д-6 и Куршской косы преобладал слабый северо-восточный и северный ветер 2–4 м/с.

На карте скоростей приводного ветра на 11 августа 2004 г. для утреннего пролета спутника хорошо видна небольшая область пониженных скоростей менее 2 м/с в районе между латвийским побережьем и о-ва Готланд (см. рис. 3.12). Аналогичная область наблюдалась в поле скоростей приводного ветра в этот день и для вечернего

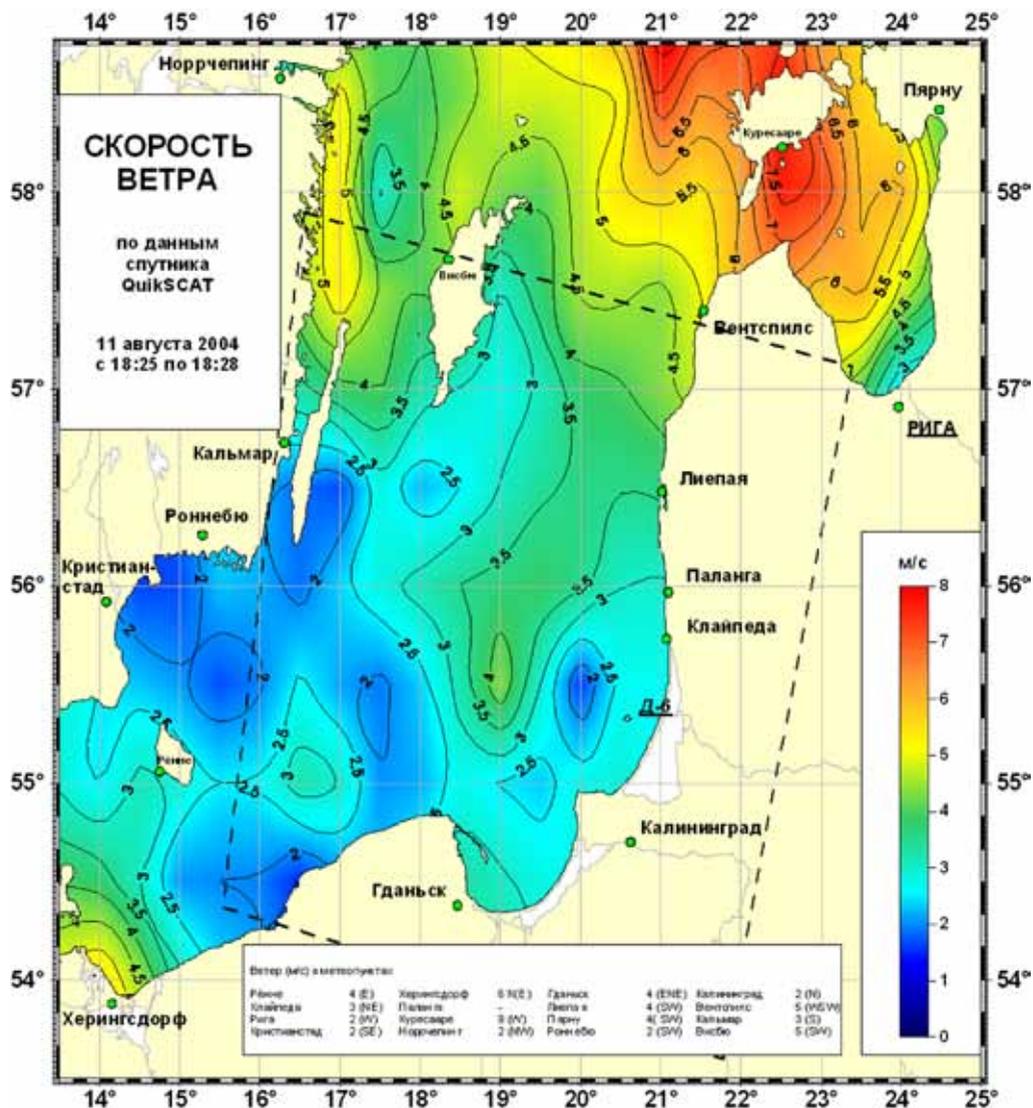


Рис. 3.13. Скорость приводного ветра по данным измерений скаттерометра SeaWind ИСЗ QuikSCAT на 11 августа 2004 г. за временной интервал 18:25–18:28 GMT (вечерний пролет). Штриховой линией показаны границы РЛИ спутника Envisat на 11 августа 2004 г. 09:06:01 GMT

пролета спутника. Она располагалась уже севернее Самбийского полуострова в северо-западном направлении от платформы Д-6 (см. рис. 3.13). При анализе РЛИ ASAR Envisat от 11 августа 2004 г. 09:06:01 (рис. 3.14, см. с. 156) эта область ветрового затишья (зона штиля 4) хорошо видна. Этот пример хорошо иллюстрирует необходимость использования дополнительной информации о скорости ветра на акватории всего моря для корректной интерпретации РЛИ.

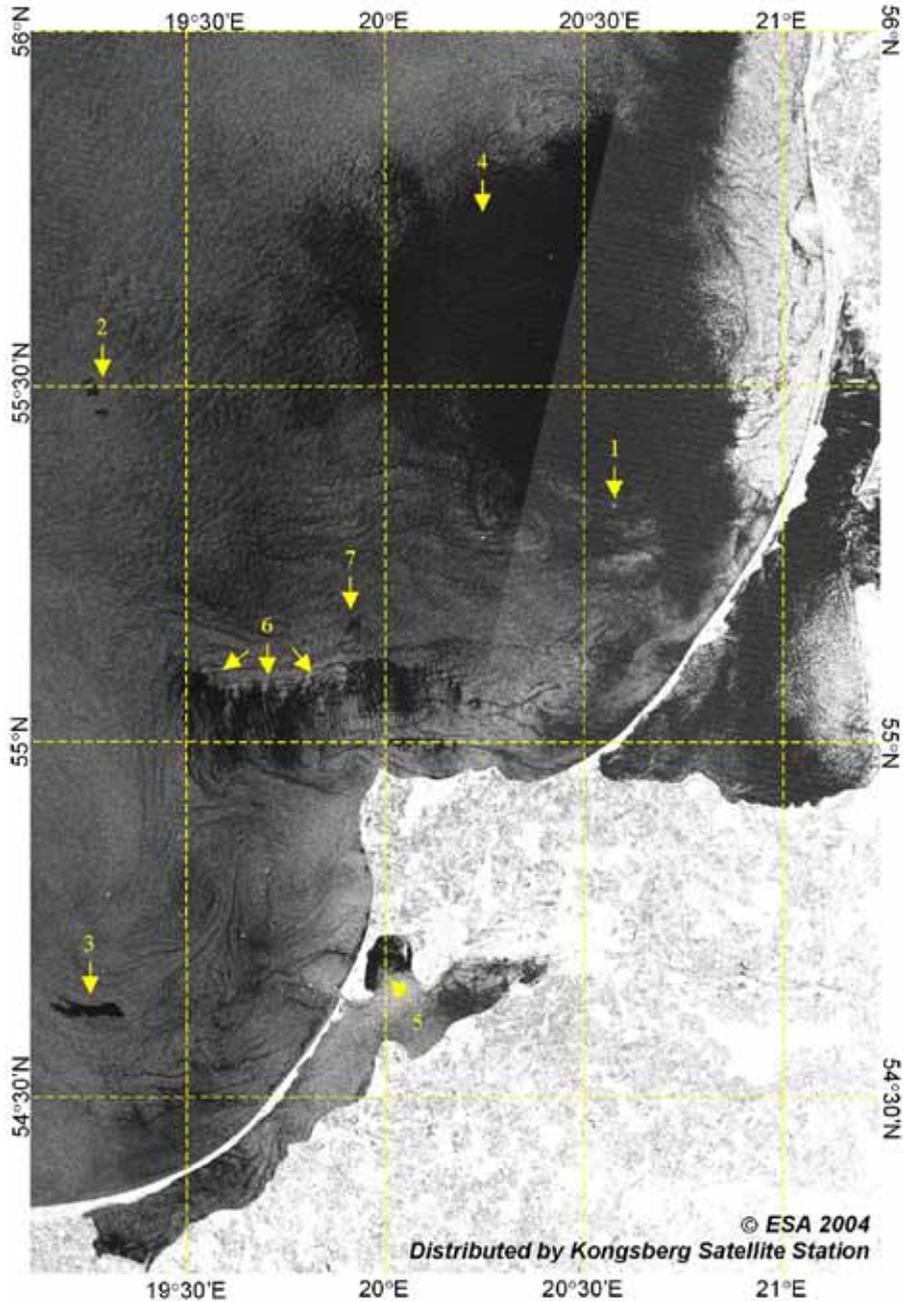


Рис. 3.14. РЛИ изображение юго-восточной части Балтийского моря со спутника Envisat на 11 августа 2004 года 09:06:01 GMT (Орбита — 12801, Трек — 222, Кадр — 2484). Цифрами обозначены: 1 — платформа Д-6; 2 — остаточное нефтяное пятно (19° 15' в.д., 55° 27' с.ш.); 3 — остаточное нефтяное пятно (19° 12' в.д., 54° 38' с.ш.); 4 — зона штиля; 5 — область ветровой тени; 6 — скопление ПАВ органического происхождения; 7 — пятно ПАВ

Рассмотрим, как карты поля скорости приводного ветра, рассчитанные по представленной выше методике, отражают ситуации более сильного ветра, например, которая была 15 августа 2004 г. (рис. 3.15). Средняя скорость ветра на данной акватории Балтийского моря превышала 6 м/с. Отчетливо прослеживаются три области сильного ветра. Первая располагается над о-вом Борнхольм (более 7,5 м/с), вторая — около эстонского побережья (более 7 м/с) и третья — в центре юго-восточной части Балтийского моря (более 6,5 м/с). При этом в районе юго-восточнее о-ва Эланд и в Гданьском заливе наблюдаются области пониженных скоростей (менее 5 м/с). Эта картина хорошо согласуется с погодными условия в юго-восточной части Балтийского моря. Этот период характеризовался установлением обширной области относительно высокого атмосферного давления над центральной Европой, при этом в районе платформы и Куршской косы 15 августа дул западный ветер со скоростью 4–7 м/с.

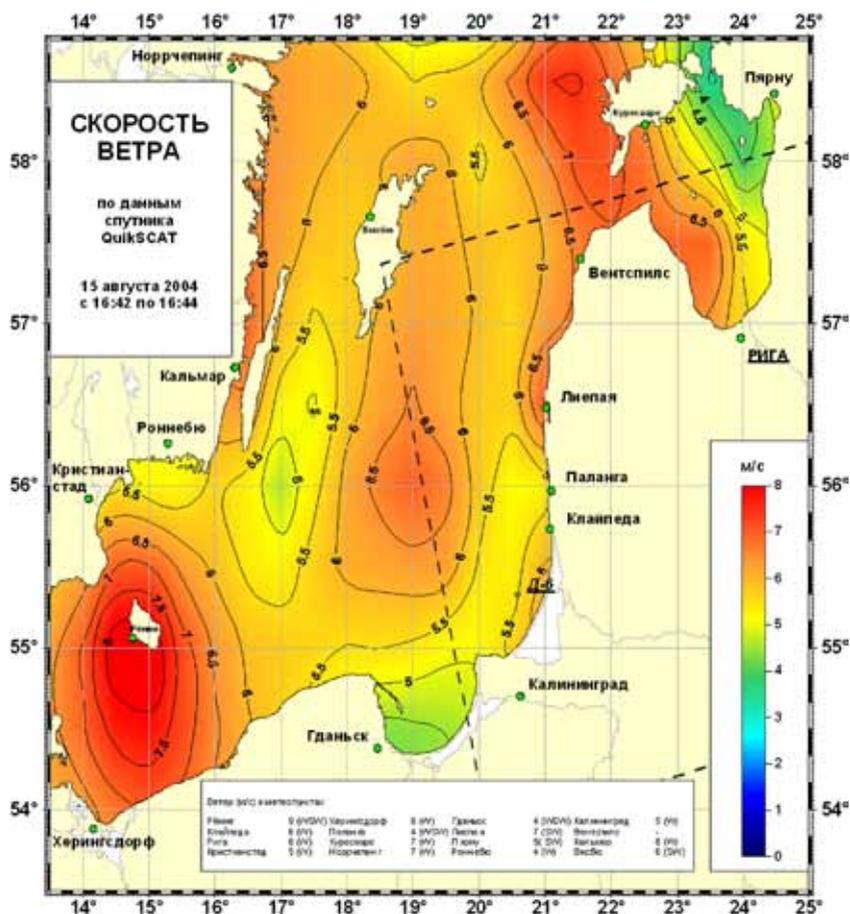
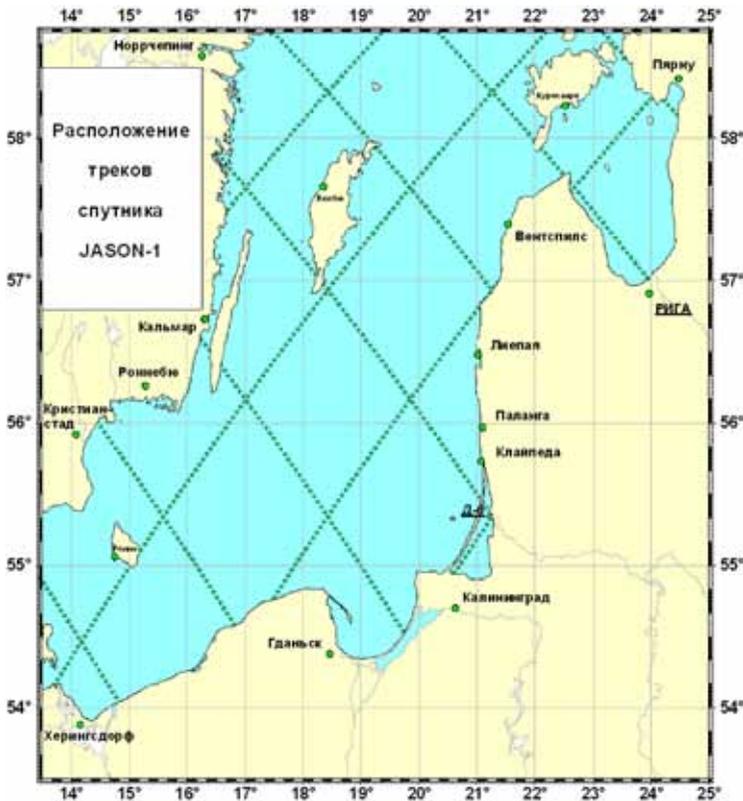


Рис. 3.15. Скорость приводного ветра по данным измерений скаттерометра SeaWind ИС3 QuikSCAT на 15 августа 2004 г. за временной интервал 16:42–16:44 GMT (вечерний пролет). Штриховой линией показаны границы РЛИ спутника Envisat на 15 августа 2004 г. 20:05:13 GMT

К сожалению, данные скаттерометрических измерений имеют некоторые недостатки. Во-первых, низкое пространственное разрешение (25 км) по сравнению с другими спутниковыми данными. Во-вторых, невысокая точность определения скорости и направления ветра — 2 м/с и 20°, соответственно. Однако они доступны дважды в сутки и независимо от облачности. Верификация и калибровка спутниковой информации по данным метеонаблюдений в открытом море (например, с платформы Д-6) позволяла повысить точность расчетов поля приводного ветра.

В совокупности с результатами модельных расчетов данные спутниковой альтиметрии, полученные по оперативным данным, можно использовать и для мониторинга поля ветровых волн, что и было реализовано в программе мониторинга юго-восточной части Балтийского моря. В нашем случае использовались результаты модельных расчетов, полученных по дискретной спектральной модели ветровых волн WW3 или WaveWatch III (Tolman, 1989), разработанной в FNMOC для ВМС США. На сегодня эта модель для Балтийского моря несколько устарела (Проблемы исследования..., 1995) по сравнению с новыми моделями (WAMDI Group, 1988). Однако возможность получать уже готовые расчеты по Интернету в режиме свободного доступа и «реального» времени (примерно через 12 часов после проведения расчетов) делают эти данные незаменимыми для интерпретации РЛИ.



Р и с . 3.16. Расположение треков спутника Jason-1 на акватории центральной Балтики

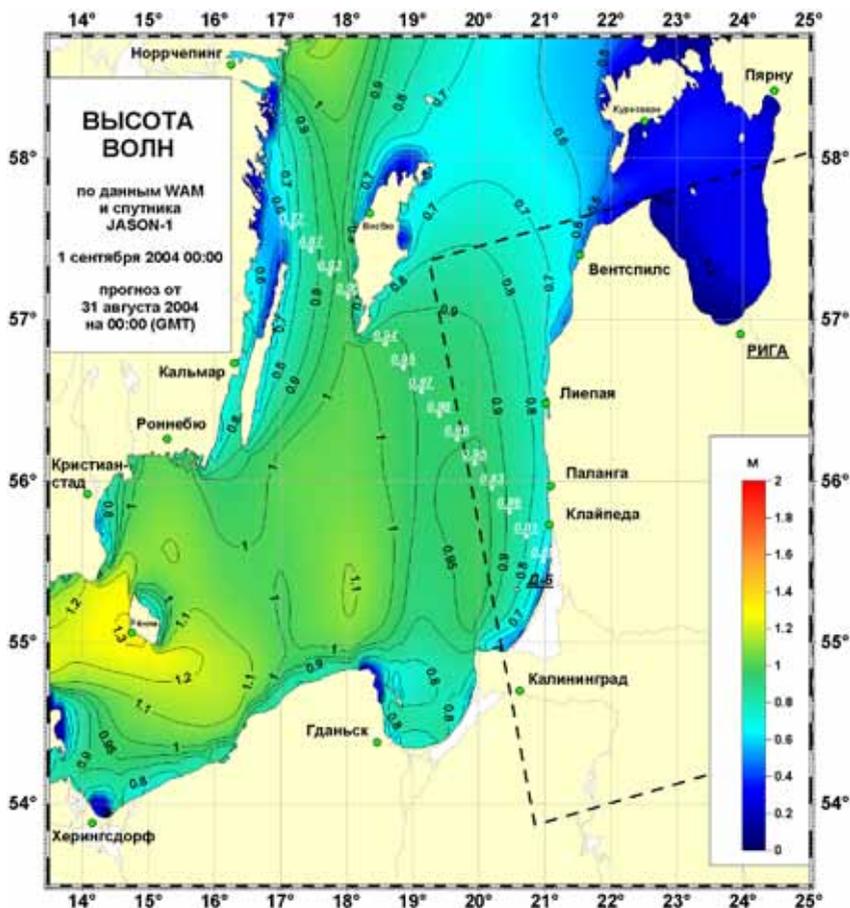


Рис. 3.17. Высота ветровых волн по данным измерений альтиметра спутника Jason-1 на 1 сентября 2004 г. на 00:00 (GMT) Штриховой линией показаны границы РЛИ спутника Envisat на 31 августа 2004 г. 20:02:21 (GMT)

Несмотря на хорошее пространственное разрешение спутниковой альтиметрии — 6,5 км — по сравнению с данными спутниковой скаттерометрии, рассчитанные по ним высота ветровых волн и скорость ветра обладают рядом недостатков. Во-первых, периодичность повторения измерений вдоль одного и того же трека составляет около 10 суток. Во-вторых, измерения проводятся только вдоль треков (рис. 3.16, см. с. 158). Эти недостатки обусловлены в первую очередь параметрами орбиты спутника и особенностями самого метода.

Однако данные спутниковой альтиметрии с успехом используются для изучения синоптической и межгодовой изменчивости метеорологического и гидрологического режимов океанов (Satellite Altimetry..., 2001) и внутренних морей (Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011).

Пример совместного использования результатов расчетов по модели WW3 и данных спутниковой альтиметрии для 1 сентября 2004 г. приведены на рис. 3.17. В поле

высоты ветровых волн отчетливо видны области тени за островами Борнхольм и Готланд, образовавшиеся при юго-западном ветре, который устойчиво дул с 28 августа по 1 сентября со скоростью 3–6 м/с. Данные спутника Jason-1, показанные на рисунке в виде маркеров со значениями высоты волн, хорошо соответствуют результатам модельных расчетов вдоль трека спутника.

3.5. РАДИОЛОКАЦИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

3.5.1. Обоснование необходимости радиолокационного мониторинга и комплексного подхода

Основными средствами наблюдения за нефтяными пятнами в проекте оперативного мониторинга добычи нефти на Кравцовском нефтяном месторождении и юго-восточной части Балтийского моря из космоса стали радиолокаторы с синтезированной апертурой ASAR Envisat и SAR RADARSAT. Это было обусловлено следующими причинами и физико-техническими особенностями РСА:

- отсутствие в исследуемом районе регулярного авиационного и морского контроля нефтяного загрязнения морской поверхности;
- необходимость ежедневного и оперативного мониторинга района добычи нефти из-за близости берегов и морской границы с Литвой;
- большая вероятность обнаружения «чужих» нефтяных пятен в результате трансграничного переноса или пятен, принадлежащих другим источникам загрязнения;
- необходимость разграничения ответственности за потенциальное «собственное» и «чужое» нефтяное загрязнение;
- мониторинг обширной акватории юго-восточной Балтики, включая международные воды и территориальные воды сопредельных государств;
- спутниковая радиолокация — наиболее широко применяемый метод мониторинга нефтяного загрязнения морской поверхности в отсутствие регулярного авиационного и морского патрулирования;
- возможность круглосуточной работы возможность всепогодной съёмки;
- высокое пространственное разрешение ASAR Envisat (75 м) и SAR RADARSAT (25 м) позволяет с большой точностью детектировать нефтяные пятна среднего и крупного размера и оценивать их параметры, а также обнаруживать суда;
- широкая полоса захвата (300–400 км) радиолокаторов и использование двух спутников даёт возможность контролировать нефтяное загрязнение юго-восточной Балтики в среднем один раз в двое суток, при этом минимальное время между последовательными пролетами спутника составляло 11,5 часа;
- мгновенная съёмка акватории 400×400 км для ASAR Envisat и 300×300 км для SAR RADARSAT.

Очевидные преимущества и недостатки данного метода хорошо известны и были описаны выше в данной главе и гл. 2. Недостатки метода минимизировались с помощью комплексного мультисенсорного и мультиплатформенного подхода к проведению

спутникового мониторинга, который включал анализ большого количества вспомогательных спутниковых, метеорологических и океанографических данных.

При планировании радиолокационных съёмок заказывались все кадры ASAR Envisat, накрывающие точку местонахождения платформы Д-6, за исключением тех, на которых эта точка оказывалась ближе всего (от локатора) к краю полосы обзора, так как в этой зоне рассеяние носит преимущественно зеркальный характер, что не позволяло регистрировать какие-либо неоднородности на морской поверхности. За 35-суточный орбитальный цикл спутника число таких кадров составило 16 штук. Их положение, повторяющееся каждые 35 суток, показано на рис. 3.18. Таким образом, средний интервал между последовательными съёмками составлял 52,5 часа, причём минимальный интервал составлял 11,5 часа, а максимальный доходил до 4,5 суток. Для сокращения наиболее длительных, 4,5-суточных разрывов между съёмками

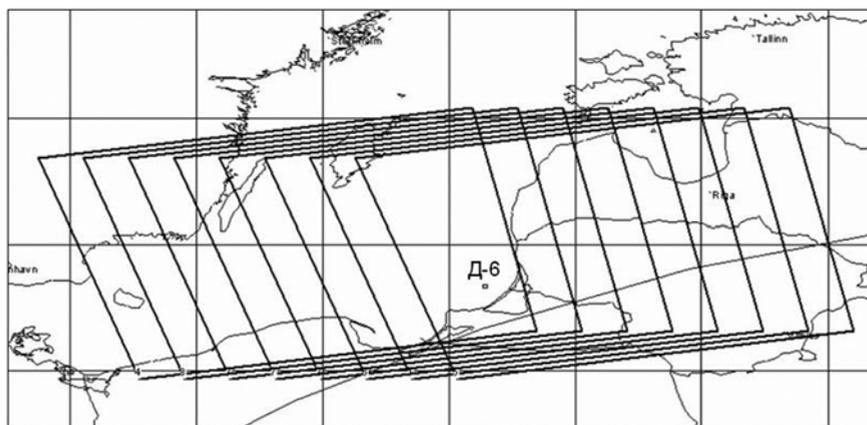
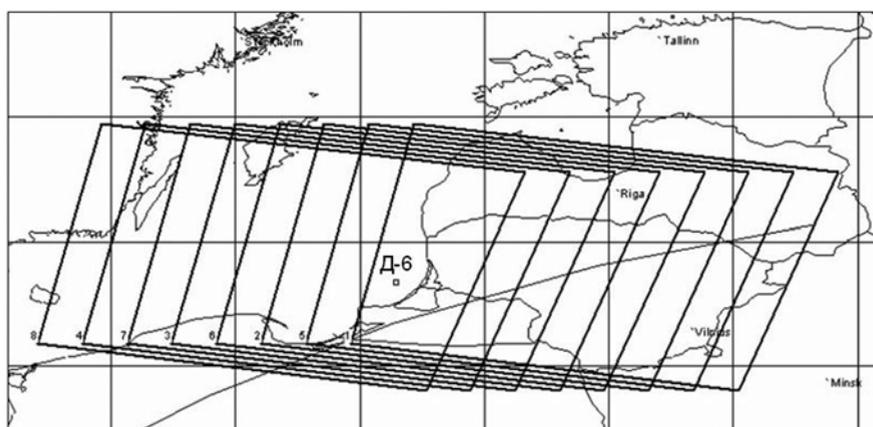
*a**b*

Рис. 3.18. Покрывание района расположения платформы Д-6 изображениями ASAR Envisat за 35-суточный цикл: *a* — на восходящих витках; *b* — на нисходящих витках

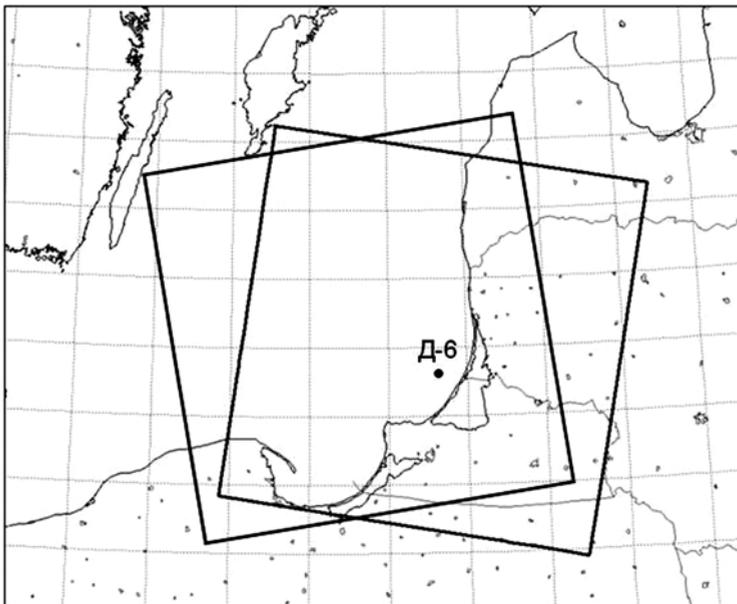
ASAR Envisat (которых набиралось по два на каждый 35-суточный цикл) заказывались SAR-съёмки со спутника RADARSAT. Пример покрытия района кадрами SAR RADARSAT на восходящем и нисходящем витках приведён на рис. 3.19. Благодаря солнечно-синхронной орбите спутников, съёмки проводились всегда примерно в одно и то же время: ASAR Envisat — в 8:50–9:10 на нисходящих витках и в 20:00–20:20 на восходящих витках, SAR RADARSAT — в 4:50–5:10 на нисходящих витках и в 16:05–16:30 на восходящих витках (время по Гринвичу).

Задача распознавания нефтяных пятен на радиолокационных снимках существенно усложняется тем, что эти пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и процессов, которые принято называть «подобиями» пятен (*Espedal, Johannessen, 2000*).

В ходе работ по регулярному радиолокационному мониторингу прибрежной зоны Балтийского моря была экспериментально исследована зависимость радиолокационных контрастов, при наличии на морской поверхности нефтяной пленки, от параметров волнения, скорости и направления ветра и состояния приподнятого слоя атмосферы. Определены условия, оптимальные для радиолокационных наблюдений загрязнений — это ветер с моря 3–9 м/с, волнение до 4 баллов, устойчивая стратификация приподнятого слоя атмосферы.

Среди РЛ-подобий нефтяных пятен, с которыми авторы столкнулись на снимках юго-восточной части Балтийского моря, можно перечислить следующие:

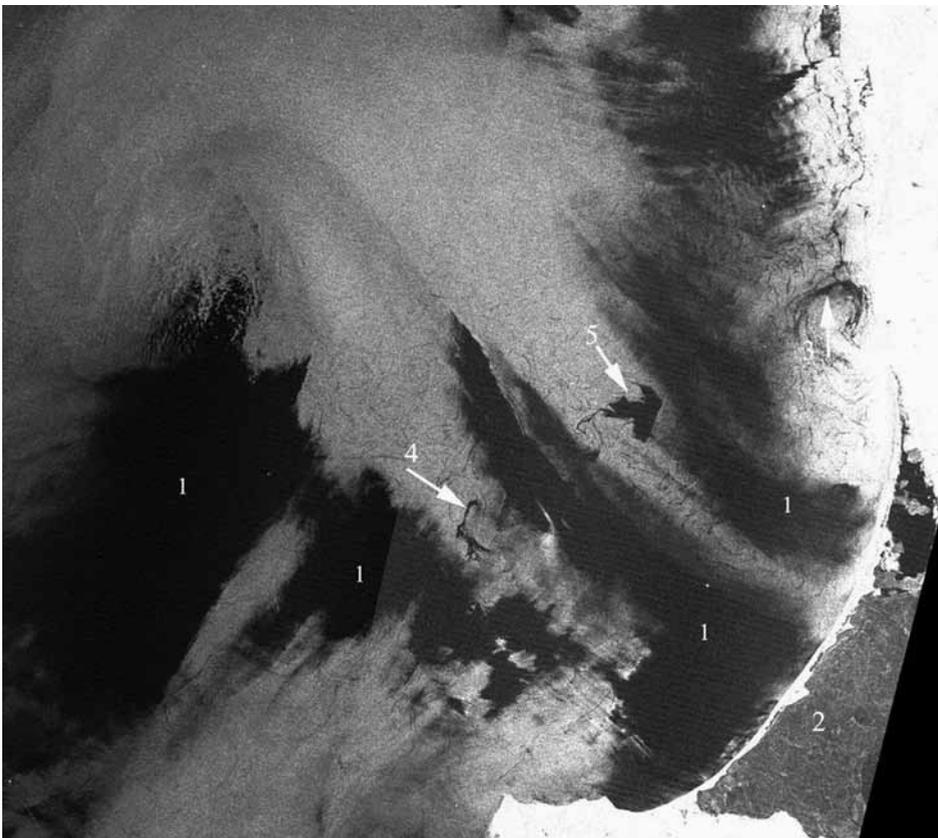
- области, затененные сушей (ветровая тень);
- области локального ослабления приповерхностного ветра;



Р и с . 3.19. Варианты покрытия района расположения платформы Д-6 изображениями SAR RADARSAT

- органические пленки;
- цветение вод;
- некоторые типы льда (шуга, «сало», молодой лед);
- гидрологические фронты;
- мелкомасштабные вихри;
- зоны апвеллинга;
- поверхностные проявления океанических внутренних гравитационных волн;
- локальные стоки различной природы (например, канализации);
- атмосферные фронты;
- внутренние волны в атмосфере;
- интенсивные мелкомасштабные атмосферные вихри;
- дождевые ячейки.

Все эти процессы и явления приводят к перестройке спектра поверхностного волнения, ослабляя резонансную рябь, и проявляются на радиолокационных изображениях в виде областей пониженного рассеяния (сликов), которые могут быть



Р и с . 3.20. Фрагмент (180×150 км) изображения ASAR Envisat юго-восточной части акватории Балтийского моря, полученного 28.03.2005 в 09:09 GMT (©ESA, 2005)

ошибочно интерпретированы как нефтяные загрязнения (*Lavrova et al.*, 2006a). Например, органические пленки естественного происхождения повсеместно встречаются на обширных площадях морской поверхности, преимущественно в теплое время года и в областях повышенной биологической активности, особенно в прибрежной зоне. Только комплексный подход к анализу РЛИ позволил минимизировать количество ложных тревог при детектировании нефтяного загрязнения.

На рис. 3.20 (см. с. 163) приведен фрагмент ASAR Envisat изображения юго-восточной части акватории Балтийского моря, полученного 28.03.2005 в 09:09 GMT в условиях слабого северо-северо-западного ветра со скоростью 0–1 м/с и слабого поверхностного волнения. Обширные области пониженного рассеяния, отмеченные цифрами 1, связаны со штилевыми условиями в поле ветра у поверхности. Цифрой 2 отмечены ледовые образования в Куршском заливе. Цифрой 3 отмечены вихревые движения на морской поверхности к северу от выхода из Куршского залива, которые проявляются благодаря наличию на морской поверхности пленок биогенных поверхностно-активных веществ. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях. Узкий изогнутый слик (цифра 4) также обусловлен биогенными ПАВ. Обращает на себя внимание темное пятно (цифра 5), имеющее площадь около 50 км². Принимая во внимание его размер, форму, местоположение и глубину модуляции обратно рассеянного сигнала оно может быть интерпретировано как область с повышенной концентрацией водорослей.

3.5.2. Методика обработки радиолокационных изображений

Непосредственным поставщиком радиолокационной информации для нужд проекта был норвежский спутниковый оператор KSAT, в ведении которого находилась приёмная станция Европейского космического агентства в Тромсё (Норвегия). Синтезированные изображения выкладывались в специально выделенный каталог на ftp-сервере KSAT в штатном режиме через 30–40 мин после пролёта спутника. Иногда из-за технических проблем задержка доходила до нескольких часов. Изображения скачивались группой обработки сразу после их появления на сервере.

Обработка данных проводилась в 4 этапа.

1-й этап: Предварительная обработка РЛИ

Загруженные с FTP-сервера изображения подвергались следующей предварительной обработке:

- координатная привязка по навигационным данным, содержащимся в служебной информации к каждому изображению; в результате оно представлялось в координатах долготы-широты;
- вырез определённого фрагмента РЛИ в окрестностях платформы Д-6, соответствующего согласованному с ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» району мониторинга;
- подбор в интерактивном режиме гистограммы для вырезанного фрагмента с целью наилучшего визуального восприятия основных информативных сигналов на морской поверхности;
- нанесение координатной сетки.

2-й этап: Тематическая обработка РЛИ

Географически привязанные и радиометрически откорректированные изображения подвергались тематической обработке, которая включала в себя:

- общую экспертную оценку информативности с точки зрения возможности обнаружения нефтяных пятен. При этом учитывался комплекс факторов — ветровые условия, волнение, присутствие других океанических явлений в виде сигнатур, подобных нефтяным пятнам;
- идентификация нефтяных пятен по их геометрическим и текстурным признакам, а также с учётом наличия поблизости судов — потенциальных источников загрязнения. Основным методом диагностики нефтяных пятен была экспертная оценка. Для улучшения надёжности идентификации активно привлекались метео- и спутниковые данные по скорости ветра, волнения, а также спутниковые карты поля ТПМ, взвеси, цветения вод и льда, весь комплекс вспомогательной информации;
- определение координат, размеров и площади пятен;
- обнаружение возможных источников их появления (суда, стационарные платформы, береговые терминалы и предприятия, трубопроводы);
- отслеживание направления и скорости дрейфа пятен (на основании данных о ветре и течениях) и их исчезновения по серии последовательных снимков, прогноз направления и скорости переноса пятен;
- основными индикативными признаками для отнесения снимков к категории нефтяных пятен служат: характерные формы нефтяных пятен, линейные размеры в пределах единиц километров для обычных (неаварийных) разливов, резкие границы, наличие поблизости судов, отсутствие процессов и явлений в море или в атмосфере, которые могут приводить к появлению подобий нефтяных пятен.

Более обширные и/или не имеющие резких границ темные области связаны с ослаблением волнения по другим причинам — из-за слабого ветра или из-за внутриокеанических процессов (цветение вод, течения, подъем глубинных вод, лед и т. д.). Внутри таких областей обнаружить нефтяные пятна, как правило, не представлялось возможным.

Координаты обнаруженных нефтяных пятен фиксировались и в дальнейшем использовались для отслеживания их распространения на последующих снимках. Обнаруженные нефтяные пятна оконтуривались, наносились на координатную сетку, а также делалось их увеличенное изображение. При наличии поблизости судов, на которых могло пасть подозрение как на источник загрязнения, определялись их координаты. Отметим, что в 2004–2005 гг. система автоматической идентификации судов еще не была широко распространена и не находилась в свободном доступе.

3-й этап: Подготовка отчёта

По результатам комплексной обработки каждого радиолокационного снимка составлялся отчёт. По данным всех отчётов, полученных за неделю, заказчику представлялся еженедельный информационный бюллетень, в котором приводился:

- анализ гидрометеорологической и ледовой обстановки за неделю;
- все полученные радиолокационные изображения заданного района;

- описание наблюдаемых явлений и анализ (в первую очередь) тех из них, которые могут быть ошибочно отождествлены с нефтяными пятнами;
- сводка всех обнаруженных нефтяных пятен с их количественными характеристиками;
- характеристика возможных источников пятен;
- карта расположения пятен;
- укрупнённые фрагменты РЛИ с наиболее значительными пятнами;
- все информативные спутниковые карты ТПМ и цвета океана с анализом наблюдаемой на них структуры течений;
- прогноз распространения наиболее крупных пятен.

3.5.3. Проявление на радиолокационных изображениях сбросов нефтепродуктов с судов

подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга юго-восточной акватории Балтийского моря, представляют собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов и содержащих их жидкостей. Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров, происходят довольно редко и, как правило, не остаются без внимания прессы и общественности. Гораздо чаще загрязнение моря происходит при рутинных операциях на судах. В открытом море причинами сбросов могут быть эксплуатационные сливы, утечки, повреждения судового оборудования, аварии и др. В ожидании загрузки в порту нефтеналивные суда зачастую промывают свои танки. Таким образом, основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов. Как выяснилось, подобные незаконные сбросы настолько распространены, что в совокупности наносят гораздо больший ущерб экосистеме Балтийского моря, чем отдельные катастрофические разливы нефти (*Kostianoy*, 2008; 2012; *Костяной* и др., 2009; *Kostianoy*, *Lavrova*, 2012).

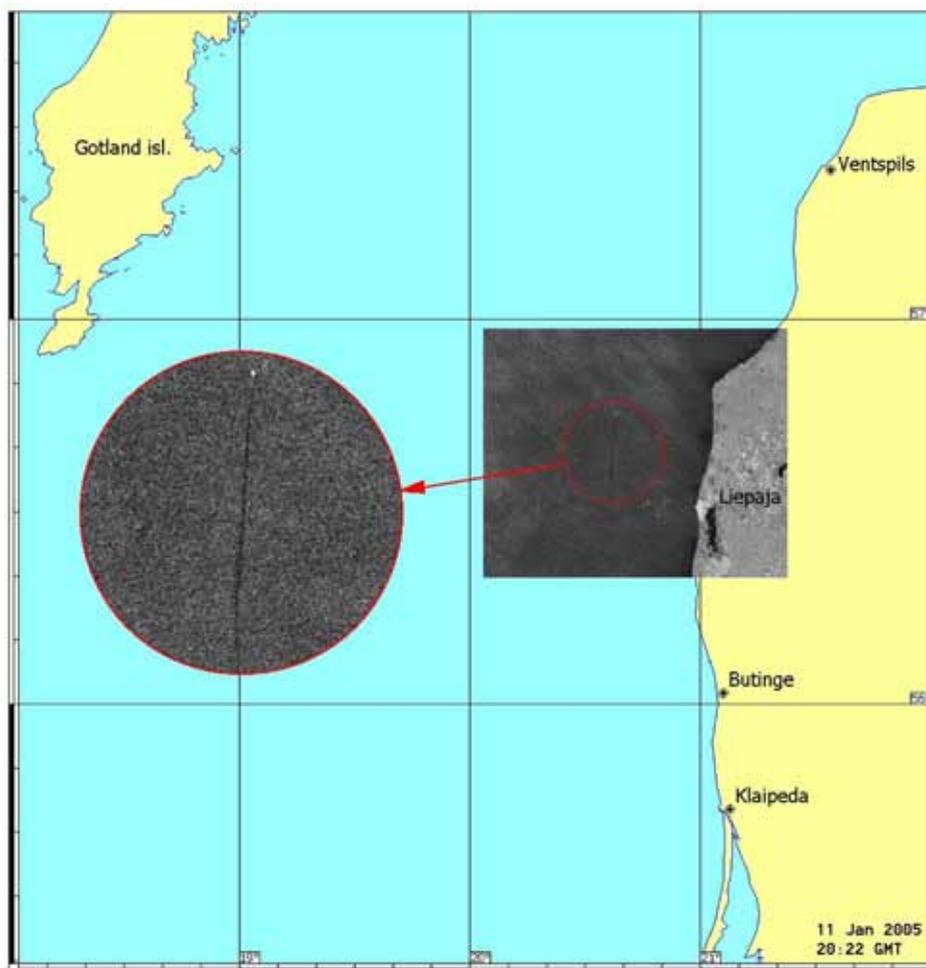
Как отмечалось выше, успешное обнаружение нефтяных загрязнений средствами спутниковой радиолокации в некоторой степени обусловлено погодными условиями. Этим объясняется тот факт, что, по радиолокационным данным, наибольшее число загрязнений приходится на период с мая по сентябрь, когда скорость ветра и волнение преимущественно умеренные или слабые. С октября по апрель нередко наблюдаются ветра со скоростью более 12 м/с и шторма — условия, при которых пленки нефтяных загрязнений быстро разрушаются и тонут, и заметного выглаживания морской поверхности не происходит.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на РЛИ, является его геометрическая форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса — с судов во время их движения и с неподвижных судов. В обоих случаях на РЛИ пятна выглядят «инородными телами» на фоне общей структуры изображения.

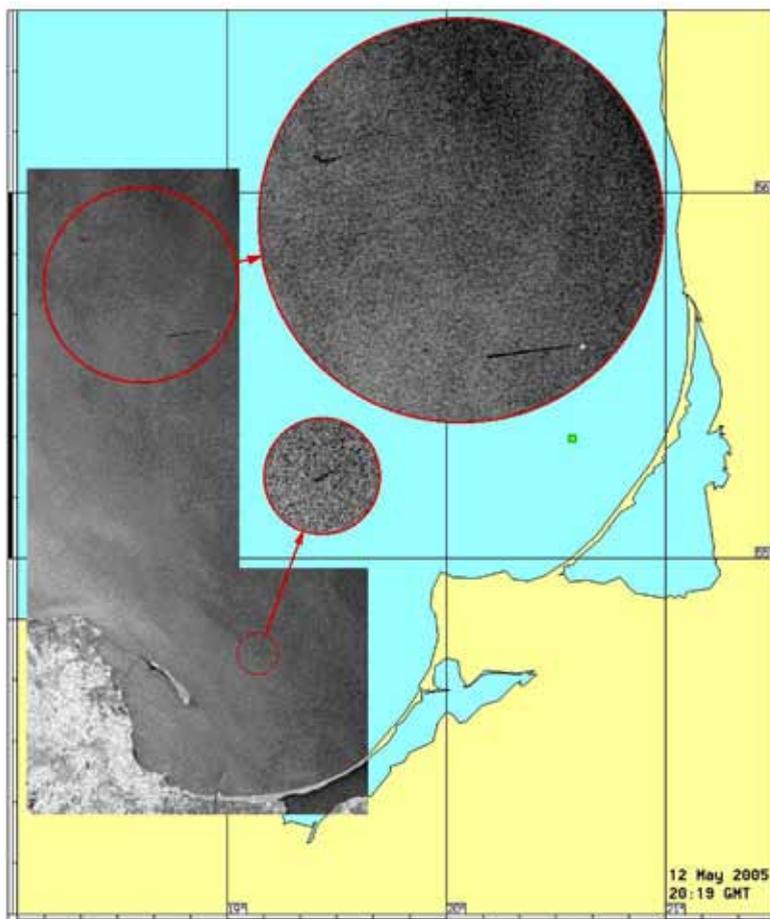
При сбросе с судна в движении пятно нефтепродуктов, в отсутствие сильного ветра и волнения, проявляется на РЛИ в виде узкой полосы понижения сигнала, повторяющей маршрут движения корабля. Чаще всего, это узкая прямая полоса или

полоса с изломом. Если сброс происходил во время радиолокационной съемки или непосредственно перед ней, то полоса сужается в сторону более свежей её части, и, как правило, удается идентифицировать судно-виновник сброса. Суда могут сбрасывать нефтепродукты на протяжении нескольких десятков километров своего пути.

На рис. 3.21 и 3.22 (см. с. 168) приведены примеры «идеальных» свежих сбросов. Данные получены в условиях умеренного ветра и небольшого волнения. Сужение полос соответственно к северу и к востоку, свидетельствует о том, что суда, сбрасывающие нефтепродукты, движутся в этих направлениях. Яркие белые точки на северном и восточном концах полос показывают текущее положение судов. В первом случае полоса загрязнений тянется на 31 км, во втором — на 15 км. На этих и последующих рисунках прямоугольные фрагменты РЛИ вставлены в географическую карту, а увеличенные фрагменты вынесены стрелками в круги и овалы.

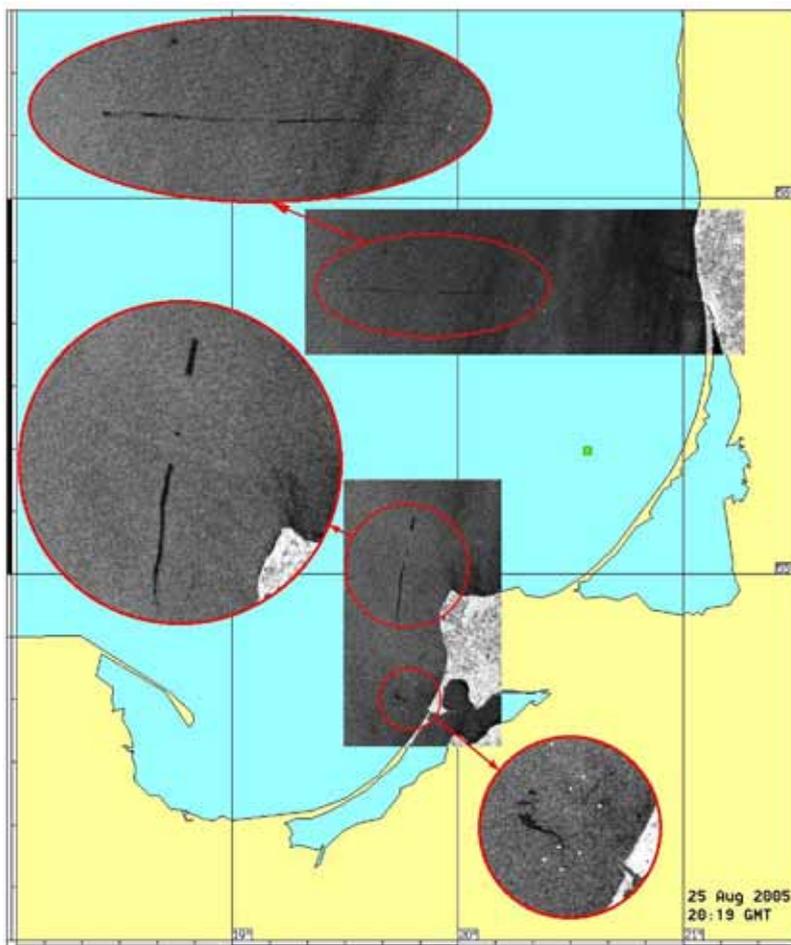


Р и с . 3.21. Сброс нефтепродуктов с судна 11 января 2005 г.



Р и с . 3.22. Сброс нефтепродуктов с судна 12 мая 2005 г.

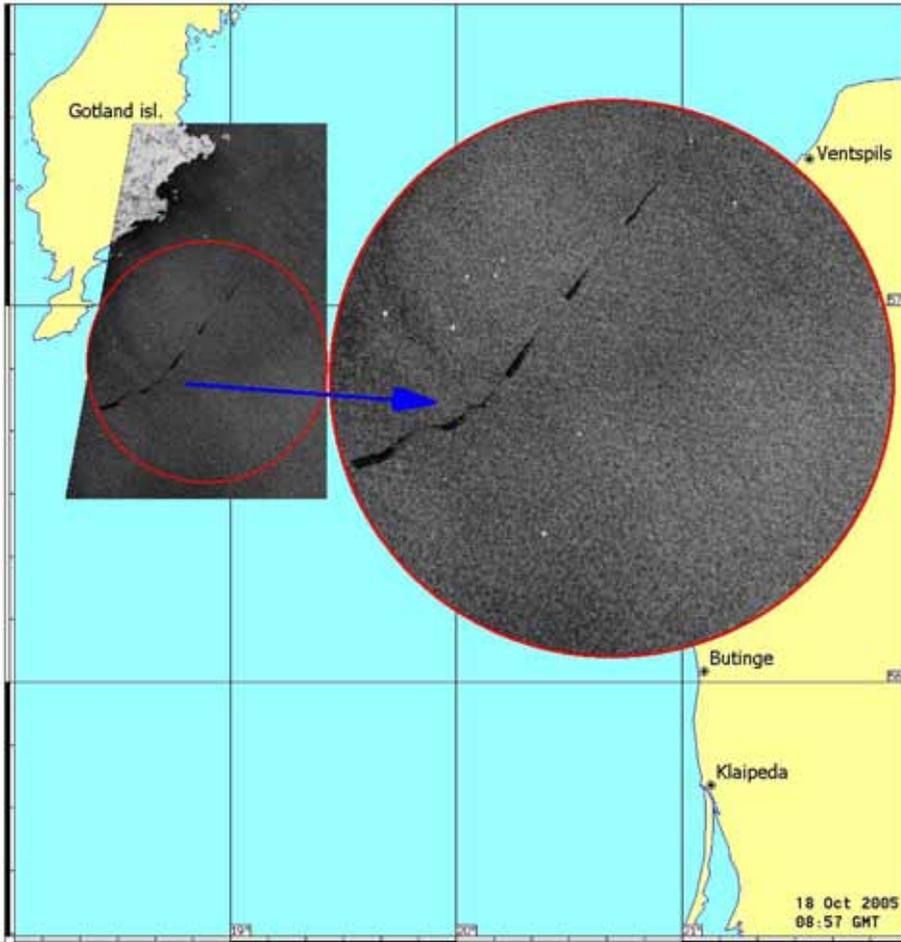
Нередко суда производят многократные сбросы загрязненных вод в движении. На рис. 3.23 (см. с. 169) и 3.24 (см. с. 170) представлены три таких примера. На первом рисунке на широте Клайпеды выделяется четкий прерывистый след протяженностью около 34 км. Заканчивается он яркой точкой, отмечающей положение движущегося судна. Разлив происходит в момент радиолокационной съемки, растекание пленки еще в самом начале — полоса сужена по направлению к судну и контраст её с окружающей поверхностью невысок. Гораздо большим контрастом с окружающим фоном и степенью растекания пленки отличается прерывистая полоса протяженностью 22 км, расположенная к западу от м. Таран. Этот разлив произошел несколькими часами раньше, и судно-виновника выявить было невозможно. На рис. 3.24 от южной оконечности о-ва Готланд почти на 80 км тянется прерывистый след за судном (яркая точка), движущимся на северо-восток. Очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнений на момент радиолокационной съемки составляет порядка 67,5 км².



Р и с . 3.23. Сброс нефтепродуктов с судна 25 августа 2005 г.

Усложнение гидрометеорологических условий — усиление приводного ветра, развитие волнения — затрудняет распознавание нефтяных пленок. На примере, показанном на рис. 3.25 (см. с. 171), виден достаточно свежий разлив из движущегося судна. Однако форма полосы уже не такая четкая, как в предыдущих случаях, сужение в сторону более свежей части разлива определить не так легко, а, кроме того, нельзя однозначно указать на судно-виновника разлива. Осложняющим фактором в данном случае является неустойчивая стратификация пограничного слоя море-атмосфера, дающая неровный, ячеистый фон на изображении.

Случай старого разлива из движущегося судна представлен на рис. 3.26 (см. с. 171). Разлив длиной 32 км подвергся частичной деградации: контраст между ним и окружающей морской поверхностью невысок, форма полосы исказилась вследствие воздействия локальных течений и приповерхностного ветра. Выявить судно, с которого произошел сброс, не представляется возможным.

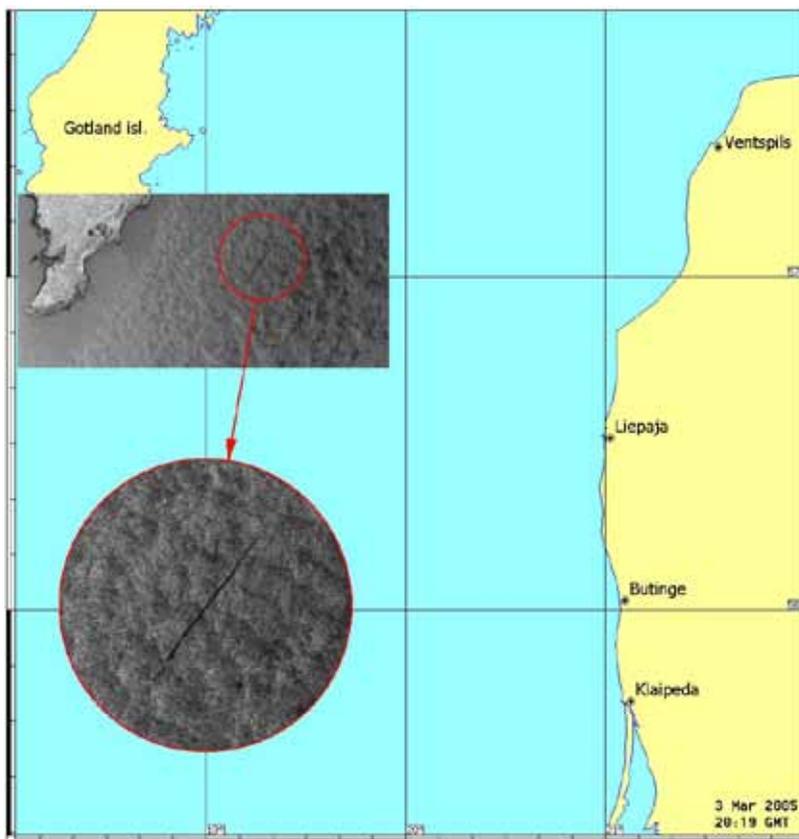


Р и с . 3.24. Сброс нефтепродуктов с судна 18 октября 2005 г.

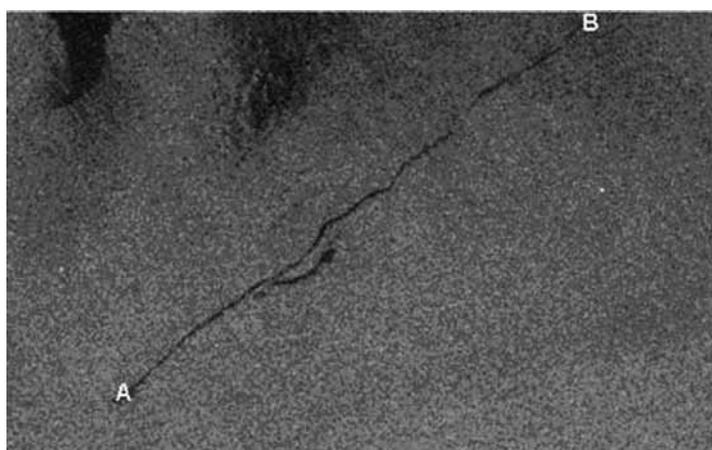
При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Однако наличие ветра и волнения может оказать существенное влияние на структуру пятна. В некоторых случаях пятно может вытянуться в линию так, как будто сброс произошел с движущегося судна.

Ветер существенно влияет на внутреннюю структуру нефтяного разлива, как напрямую, так и опосредовано. Под непосредственным воздействием ветра пленка нефти перемещается, а нефть аккумулируется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды.

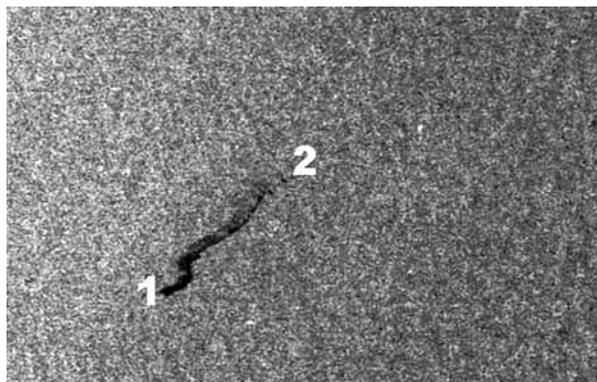
Наиболее распространенный из таких процессов — циркуляция Ленгмюра, представляющая собой вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Движение воды в вихрях происходит в плоскости, перпендикулярной направлению скорости ветра.



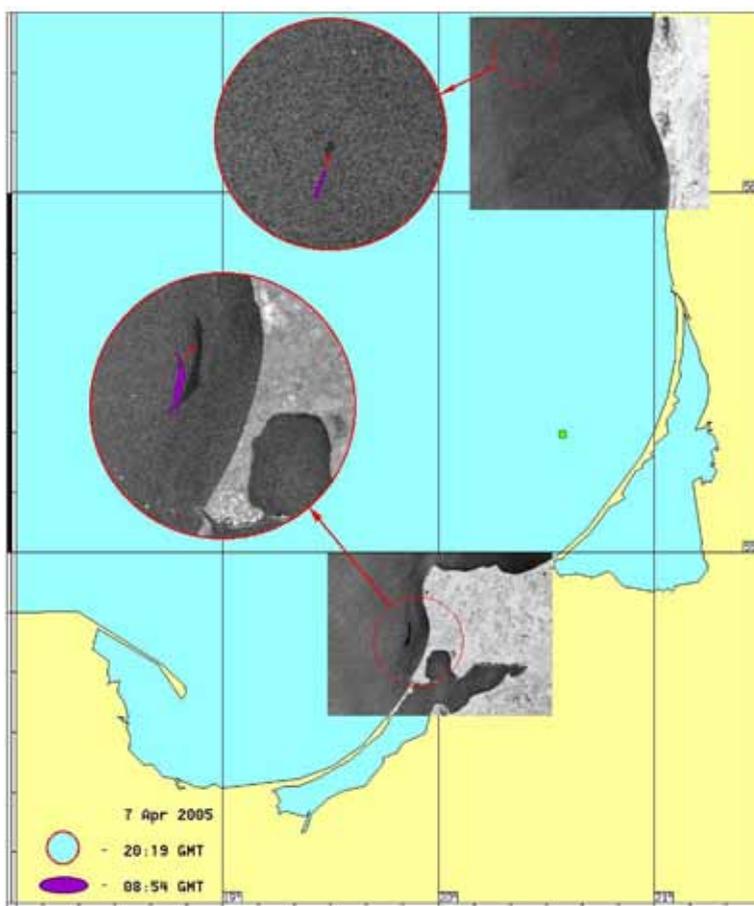
Р и с . 3.25. Сброс нефтепродуктов с судна 3 марта 2005 г.



Р и с . 3.26. Сброс нефтепродуктов с судна к востоку от южной оконечности о-ва Эланд 2 ноября 2004 г. (©ESA, 2004)



Р и с . 3.27. Трансформация нефтяного пятна 19 ноября 2005 г.
(©ESA, 2004)



Р и с . 3.28. Смещение и трансформация нефтяных пятен 7 апреля 2005 г.

Тем самым на поверхности моря возникают перемежающиеся зоны дивергенции и конвергенции. В последних и концентрируется нефть. Пятно приобретает характерный вид «гребенки». Пример такой трансформации полосы сброса с движущегося судна приведен на рис. 3.27 (см. с. 172).

На рис. 3.28 (см. с. 172) показан пример того, насколько может измениться форма и положение пятен за половину суток даже при стабильных метеорологических условиях. В течение 11 часов 25 минут 7 апреля 2005 г. метеорологические условия существенно не менялись. Ветер изменил направление с южного на юго-западное, скорость его оставалась в пределах 8–9 м/с. Стратификация пограничного слоя море-атмосфера сохранялась устойчивой, высота волн не превышала 1 м. За время между съемками пятно, расположенное к северу от выхода из Балтийского канала, несколько растеклось в северо-восточном направлении, Протяженность пятна увеличилась с 5,4 до 8,5 км, общая площадь выросла с 2,8 до 3,8 км². Пятно, расположенное к западу от Швентоя, сместилось и растеклось в восточном направлении. Площадь его увеличилась с 0,9 до 1,5 км².

Анализ фактической эволюции пятен нефтяных загрязнений в случаях, когда данные позволяют это сделать, имеет большое значение с точки зрения совершенствования моделей, используемых для расчета дрейфа и трансформации пятен нефтяных загрязнений.

Хорошей иллюстрацией может служить случай крупного нефтяного загрязнения, выявленного в Гданьском заливе 30 июля 2004 г. (20:08 GMT) (рис. 3.29а, см. с. 174). На радиолокационном изображении отчетливо выделяется большое нефтяное загрязнение, представляющее собой цепочку из пяти пятен общей площадью 26 км². Специфическая форма рассматриваемого нефтяного загрязнения позволила предположить, что первоначально крупное нефтяное загрязнение вытянутой формы было локализовано восточнее, а затем под влиянием течений и ветра дрейфовало в западном направлении и распалось на отдельные пятна. Эту стадию деградации первоначального нефтяного пятна и зарегистрировало радиолокационное изображение. Сопоставление радиолокационного изображения с оптическими данными спектрорадиометра MODIS Terra различных каналов, полученных утром того же дня в 09:40 GMT (рис. 3.29б, см. с. 174, на котором нефтяные пятна перенесены с РЛИ), показало, что цепочка загрязнений вытянута в северо-западном направлении по периферии антициклонической части диполя (грибовидного течения), которое является комбинацией узкой струи с парой вихрей противоположного знака на конце. Это грибовидное течение расположено в центре Гданьского залива. Предположительно, 30 июля перемещение этих нефтяных сликов могло определяться интенсивностью вихревых движений в диполе, движением самого диполя, который за период с 28-го по 30 июля повернулся по часовой стрелке на юг на 90°, а также скоростью и направлением ветра.

Согласно прогнозу модели Seatrack Web, цепочка нефтяных пятен должна была перемещаться в южном направлении под воздействием полей ветра и течения и в течение двух дней достичь Вислинской косы. Отклонение прогнозных данных от данных наблюдений объясняется тем, что эта численная модель не всегда способна учитывать наличие таких мезо- и мелкомасштабных динамических особенностей, как вихри, диполи, струи, филаменты, меандры и т. д. На рис. 3.29б видно, что нефтяные слики перемещаются практически вдоль линий тока антициклонического вихря.

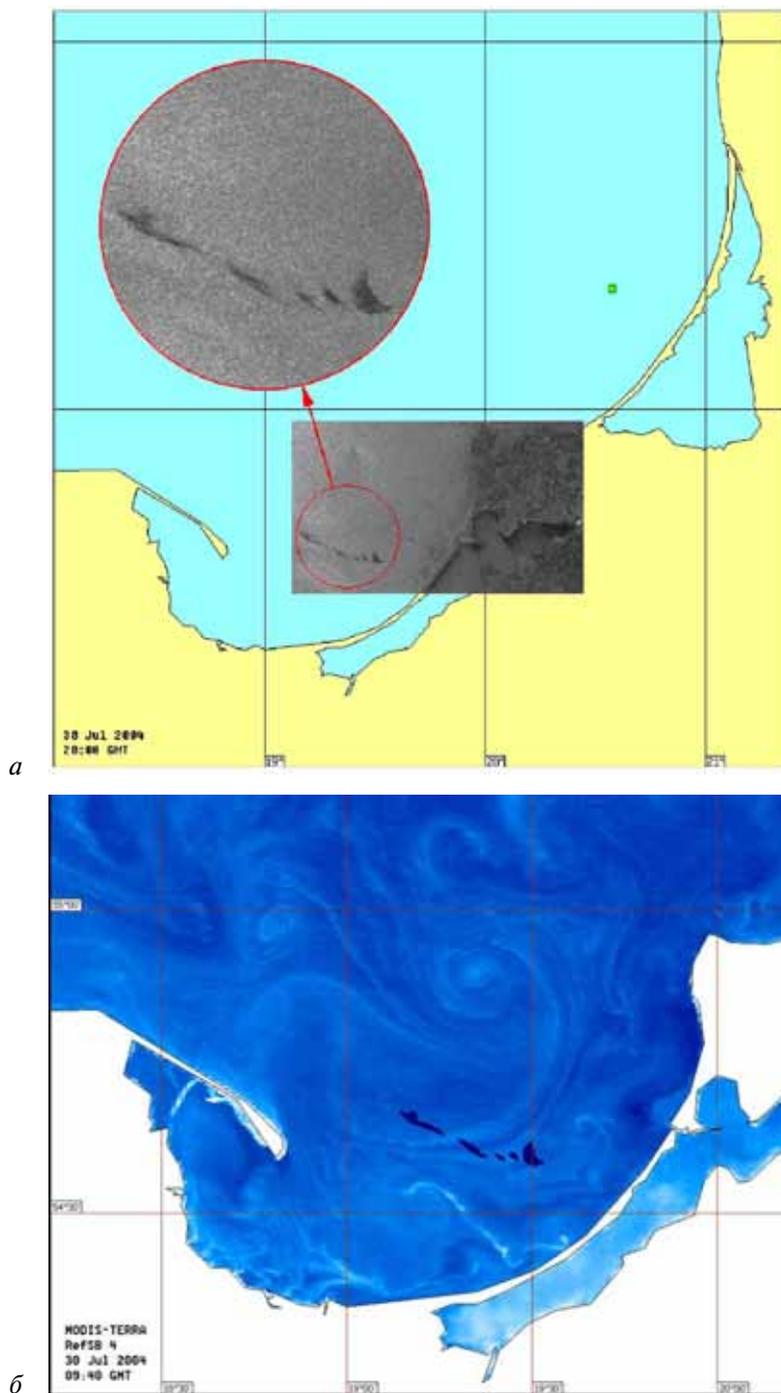
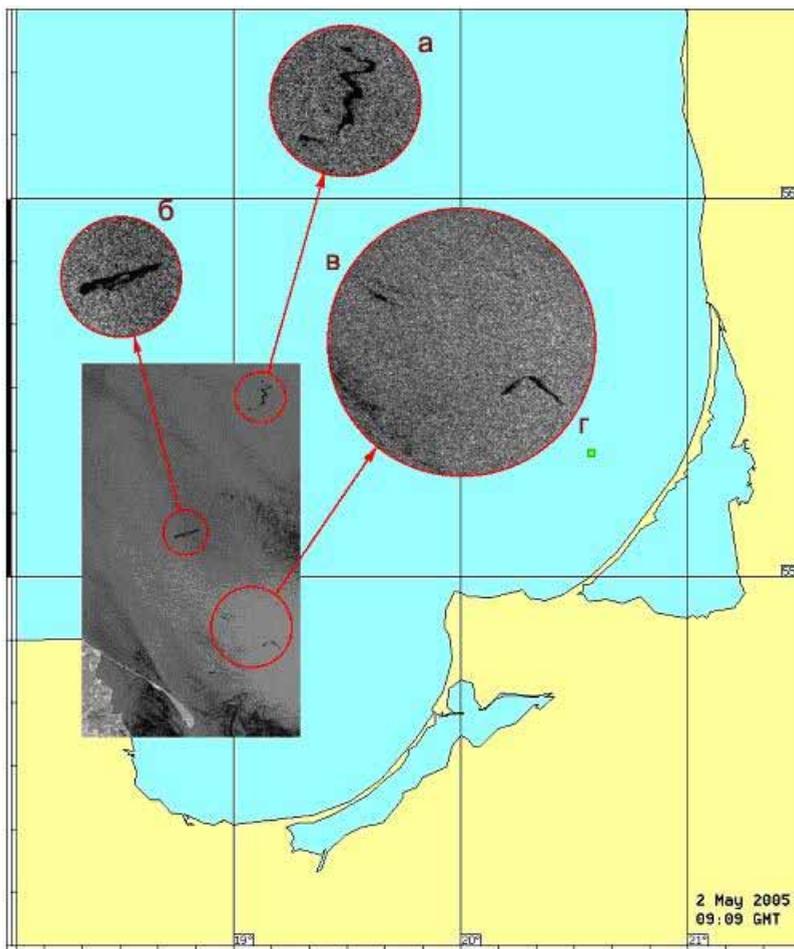


Рис. 3.29. Цепочка нефтяных пятен 30 июля 2004 г.:
а — на РЛИ; б — нанесенная на оптический снимок с MODIS Terra



Р и с . 3.30. Стики различной природы в южной части Балтийского моря 2 мая 2005 г.

Небольшое смещение объясняется разницей в 10 часов между моментами съемки MODIS Terra (утро) и ASAR Envisat (вечер).

Надо отметить, что в условиях облачности, обычных для Балтийского моря, модель Seatrack Web служит единственным источником информации о дрейфе и эволюции нефтяных пятен, так же как и о поле поверхностных течений.

Как уже упоминалось ранее, выявление нефтяных загрязнений часто затруднено из-за наличия так называемых «подобий нефтяных пятен» — явлений и процессов, радиолокационные образы которых сходны с проявлениями нефтяных пятен. Чаще всего возникает необходимость различать сбросы нефтепродуктов и полосы и пятна понижения сигнала, связанные с наличием пленок поверхностно-активных веществ биогенного происхождения и цветением водорослей. Характерный пример приведен на рис. 3.30. Изображение получено в условиях слабого восточного ветра со скоростью 2–5 м/с.

На РЛИ наблюдаются многочисленные нитевидные слики, соответствующие скоплениям плёнок поверхностно-активных веществ, преимущественно биогенного происхождения. На подобном фоне выявление нефтяных загрязнений крайне затруднено. Тем не менее, тщательный анализ положения и геометрических форм сликов, глубины их контраста с фоном, а также локальных параметров ветра и волнения позволяет выделить пятна «а», «б» и «г» как наиболее вероятные проявления сбросов нефтепродуктов с судов. Пятно «в» с одинаковой вероятностью можно отнести как к сбросам с судна, так и к биогенным сликам.

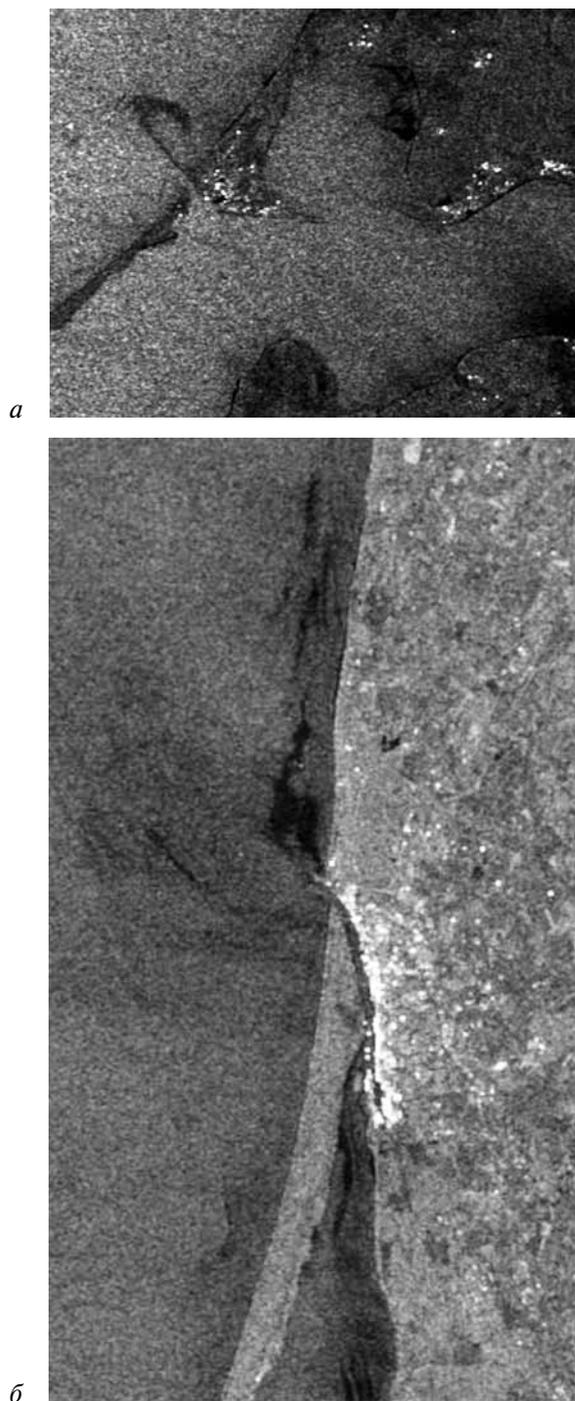
3.5.4. Проявление на радиолокационных изображениях загрязнений, выносимых реками, каналами, течениями в проливах, утечек с береговых сооружений

Несанкционированный сброс с судов вод, содержащих нефтепродукты, является не единственным источником загрязнений морской поверхности в юго-восточной части Балтийского моря. За время проведения спутникового мониторинга неоднократно наблюдались выносы загрязненных вод из Куршского и Калининградского заливов через каналы. Особенно часто такая ситуация наблюдалась в весенний период, когда в заливы во время весеннего половодья с выносами многочисленных рек и речушек попадает большое количество органических веществ. Большой вклад в загрязнения вносят порты Балтийск и Клайпеда, находящиеся в районе этих каналов. Причем, чем выше концентрация нефтепродуктов в загрязняющей пленке, тем пятно медленнее растекается, дольше сохраняет свою форму и остается локализованным на выходе из залива. На рис. 3.31 (см. с. 177) представлены два фрагмента одного и того же изображения, полученного 19 августа 2005 г. в 20:08:19 GMT.

Это ASAR-изображение морской поверхности получено в условиях ветра скоростью 6–7 м/с, имеющего юго-западное направление. Поверхностное волнение на момент получения снимка — слабое до 0,3 м. На рис. 3.31а хорошо выделяется область пониженного рассеяния, связанная с выносом загрязненных вод из Калининградского залива. Площадь пятна составляет около 4,2 км². На рис. 3.31б представлен вынос из Куршского залива. Скорее всего выглаживание поверхности происходит из-за выноса органических веществ смешанного происхождения. Выглаженный след под действием течения сначала распространяется на северо-запад, а потом, испытывая влияние юго-западного ветра, распространяется на северо-восток.

На рис. 3.32 (см. с. 178) представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 31 октября 2005 г. в 20:14:06 GMT, в условиях достаточно сильного юго-юго-восточного ветра со скоростью 8–10 м/с у побережья.

На рисунке цифрой 1 отмечена область пониженного рассеяния в районе Приморской бухты вблизи выхода из Калининградского отводного канала. Эта область отмечалась как на вечернем РЛИ от 28 октября 2005 г., так и на утреннем снимке от 31 октября 2005 г. Пятно пониженного рассеяния сохраняет компактную простую форму с четкими гладкими границами. Нет никаких сомнений, что оно вызвано наличием на морской поверхности антропогенных загрязнений, сбрасываемых через отводной канал.



Р и с . 3.31. Вынос органических веществ смешанного происхождения из Калининградского (а) и Куршского (б) заливов 19 августа 2005 г. (©ESA, 2005)

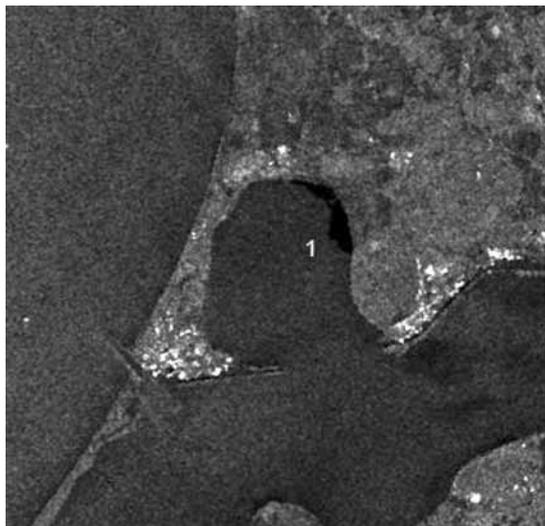


Рис. 3.32. Антропогенное загрязнение вблизи выхода из Калининградского отводного канала 31 октября 2005 г. (©ESA, 2005)

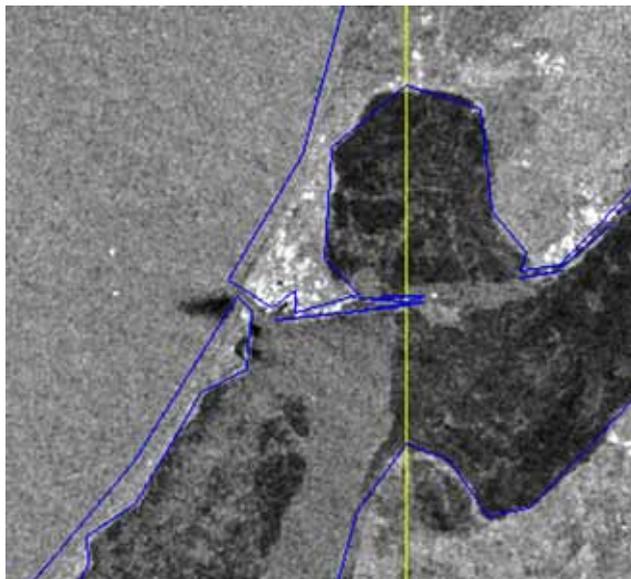
Следует отметить, что темные пятна, связанные с загрязнением морской поверхности, регулярно наблюдаются в акваториях, прилегающих ко всем крупным портам: Балтийску, Клайпеде, Швентою, Лиенае. Последствия аварии, которая произошла на нефтяном терминале Бутинге 31 января 2005 г., были обнаружены на радиолокационном снимке, полученном через два дня. Поскольку западный ветер сгонял образовавшееся нефтяное пятно к берегу, область загрязнения в открытой части моря оказалась незначительной. Общая площадь пятна составила $0,2 \text{ км}^2$.

3.5.5. Распознавание нефтяных пятен и их радиолокационных подобию естественного происхождения

Как было отмечено выше, выявление нефтяных загрязнений морской поверхности на радиолокационных снимках является достаточно сложной и неоднозначной задачей. Приведем несколько примеров сложных для интерпретации случаев, которые встретились при проведении спутникового мониторинга.

Начало весны 2005 г. было холодным в юго-восточной части Балтийского моря, и ледяной покров наблюдался в заливах и около берега даже в начале марта. В зависимости от типа льда его радиолокационный образ является различным. Как правило, он представляет собой «пятнистую» структуру, которая хорошо идентифицируется на радиолокационном изображении. Однако в отдельных случаях области пониженного рассеяния, связанные с гашением ряби во время образования молодого льда, имеют такой же характер, как и при нефтяном загрязнении.

На рис. 3.33 (см. с. 179) представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 18 февраля 2005 г. Фрагмент захватывает часть Калининградского залива, покрытого льдом, и прибрежную морскую полосу, свободную ото льда. На выходе



Р и с. 3.33. Лед на выходе из Балтийского канала 18 февраля 2005 г.
(©ESA, 2005)

из Балтийского канала, в море наблюдается область выглаживания (черное пятно), весьма напоминающая нефтяное пятно. В данном случае выглаживание морской поверхности было связано с наличием значительного количества ледяной шуги и льда в воде, выносимой из залива. Такая ситуация достаточно часто наблюдалась в феврале и марте 2005 г. Этот факт был впоследствии подтвержден визуальными наблюдениями с борта научно-исследовательского судна, вышедшего из канала в Балтийское море 12 марта 2005 г. (рис. 3.34, см. с. 180).

На фотографии, представленной на рис. 3.34, отчетливо видна полоса льда, выносимого с водой из Калининградского залива, которая уходит далеко в открытое море. Именно эти поля плавучего льда приводили к выглаживанию морской поверхности, которые периодически наблюдались на РЛИ. Следующая фотография (рис. 3.35, см. с. 180) показывает, насколько резкая граница существует между участками «шероховатой» (чистая вода) и «выглаженной» льдом морской поверхности.

На рис. 3.36 (см. с. 181) представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 6 марта 2005 г. в 09:00:24 GMT в условиях северо-восточного ветра со скоростью 7–9 м/с. Фрагмент захватывает прибрежную зону в районе порта Лиепая. Ледовые карты, получаемые из Шведского института метеорологии и гидрологии, указывают на границу молодого льда. При отсутствии этой дополнительной информации данное пятно пониженного рассеяния могло бы быть интерпретировано либо как ветровая тень (учитывая направление ветра), либо как нефтяное загрязнение (особенно это касается наиболее темной верхней части пятна).

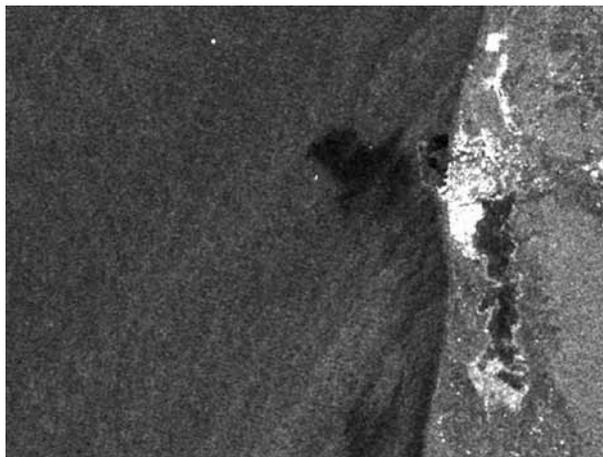
Надо отметить, что так называемая ветровая тень, или область ветрового затишья вблизи берега при дующем с побережья ветре, имеет практически такой же радиолокационный образ, как и большие по площади нефтяные загрязнения.



Рис. 3.34. Фотография полосы льда, выносимого из Балтийского канала в море 12 марта 2005 г.



Рис. 3.35. Кромка льда в море, образующая резкую границу между участками «шероховатой» и «выглаженной» морской поверхности



Р и с . 3.36. Лед в районе порта Лиепая 6 марта 2005 г. (©ESA, 2005)



Р и с . 3.37. Ветровые тени в Куршском заливе 18 сентября 2005 г.
(©ESA, 2005)

С целью адекватной интерпретации спутниковой информации использовался совместный анализ метеорологических данных (в первую очередь данных о скорости и направлении ветра) и радиолокационных изображений. Ветровая тень, в отличие от пятен нефтяных загрязнений, как правило, не имеет четко очерченных границ. Но на практике встречаются и достаточно сложные случаи, когда границы области пониженного рассеяния четко очерчены и глубина модуляции радиолокационного сигнала попадает в теоретически рассчитанный для рассеяния на нефтяных пленках интервал. На рис. 3.37 представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного

18 сентября 2005 г. в 20:14:04 GMT. На рисунке отмечена область ветрового затишья в дельте Нямунаса (1). Ветер в момент получения изображения составлял 3–5 м/с и имел юго-западное направление.

Знание локального приповерхностного ветра является необходимым условием для распознавания подобных явлений. Так, на уже упоминавшемся снимке от 31 октября 2005 г. в 20:14:06 GMT (см. рис. 3.32) тёмное пятно, которое могло бы быть отнесено к ветровой тени, благодаря знанию скорости и направления ветра, всё же было интерпретировано как вынос загрязнения из канала.

Еще одно явление, которое приводит к возникновению РЛ-подобия нефтяных пятен, это поверхностное проявление внутренних волн в атмосфере. На радиолокационных изображениях морской поверхности атмосферные волновые процессы проявляются в силу того, что связанные с ними вариации скорости и направления ветра модулируют шероховатость морской поверхности, а это, в свою очередь, отображается в модуляции сечения обратного рассеяния. Внутренние волны в атмосфере проявляются на радиолокационных изображениях в виде квазипериодических полос пониженного рассеяния. Как правило, они имеют достаточно характерный вид и не вызывают трудности при интерпретации радиолокационных изображений. Однако, если в кадр попадает часть цуга или даже единичная волна, то такая ситуация может вызвать некоторые затруднения в определении происхождения области пониженного рассеяния. На рис. 3.38 представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, на котором хорошо видны две системы внутренних волн, обозначенные как 1 и 2. Каждая отдельная волна, вне связи с другими могла бы быть интерпретирована как значительный сброс нефтепродуктов с судна.

Другой проблемой, возникающей при определении нефтяных загрязнений, является их схожесть с областями скопления цветущих водорослей. Как правило, их радиолокационные контрасты идентичны. Наличие только одного радиолокационного изображения не позволяет однозначно определить источник подавления радиолокационного сигнала. Для повышения надежности извлечения необходимой информации

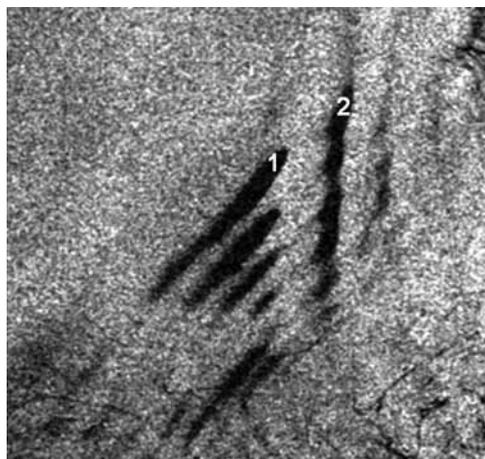


Рис. 3.38. Проявление внутренних волн в атмосфере на РЛИ морской поверхности 10 апреля 2005 г. (©ESA, 2005)

из данных радиолокационного зондирования необходимо привлекать для совместного анализа данные, получаемые разными сенсорами со спутников в оптическом и ИК-диапазонах.

В мае-июле 2005 г. в восточной части Балтики происходило бурное цветение водорослей (цианобактерий). Размеры областей цветения достигали нескольких десятков квадратных километров. На рис. 3.39 представлена фотография цветения вод в юго-восточной части Балтийского моря в конце мая 2005 г. Скопление цианобактерий может образовывать плотную поверхностную пленку, которая полностью гасит рябь (рис. 3.40). Вследствие этого данные области проявляются на радиолокационных



Р и с . 3.39. Бурное цветение водорослей 28 мая 2005 г. (фотография морской поверхности)



Р и с . 3.40. Фотография выглаженной морской поверхности в зоне штиля и цветения вод 28 мая 2005 г. Зона ряби — на ближнем плане

снимках в виде обширных темных пятен. Эти пятна зачастую ошибочно принимаются за катастрофические разливы нефти.

Так на радиолокационном снимке от 31 мая 2005 г. наблюдается размытое пятно 4, которое по глубине модуляции сигнала несколько отличается от окружающей его водной поверхности. Возможно, это скопление водорослей или цветение вод. Пятно вытянуто в пределах от $57,40^{\circ}$ с. ш., $19,59^{\circ}$ в. д. до $57,62^{\circ}$ с. ш., $19,84^{\circ}$ в. д. и в совокупности занимает более 100 км^2 (рис. 3.41).

Всего с 1 июля 2004 г. по 30 ноября 2005 г. было получено, обработано и проанализировано 230 радиолокационных изображений со спутника Envisat и 17 со спутника RADARSAT, на которых в общей сложности было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов на поверхности юго-восточной части Балтийского моря. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в данном квадрате юго-восточной Балтики, представлена на рис. 3.42 (см. с. 185).

Пунктиром отмечены районы со следами старых размытых нефтяных пятен. Зеленые квадраты — местонахождение платформы Д-6 и польских буровых платформ. Представлены реальные формы и размеры пятен. За весь период наблюдения ни одного пятна, исходящего от платформы Д-6, обнаружено не было, что подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности выполняемых на ней работ. Как и следовало ожидать, массив пятен четко вырисовывает основные судоходные трассы в юго-восточной части Балтийского моря, направленные к портам Вентспилс, Лиепая, Клайпеда, Калининград, а также трассу вдоль Готланда. Поэтому основными источниками нефтяных загрязнений являются морские суда.

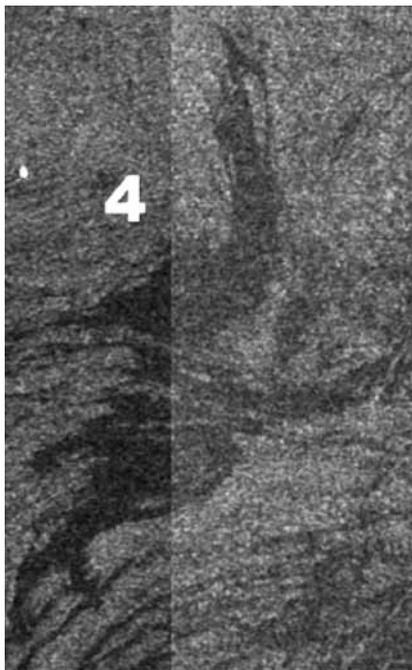
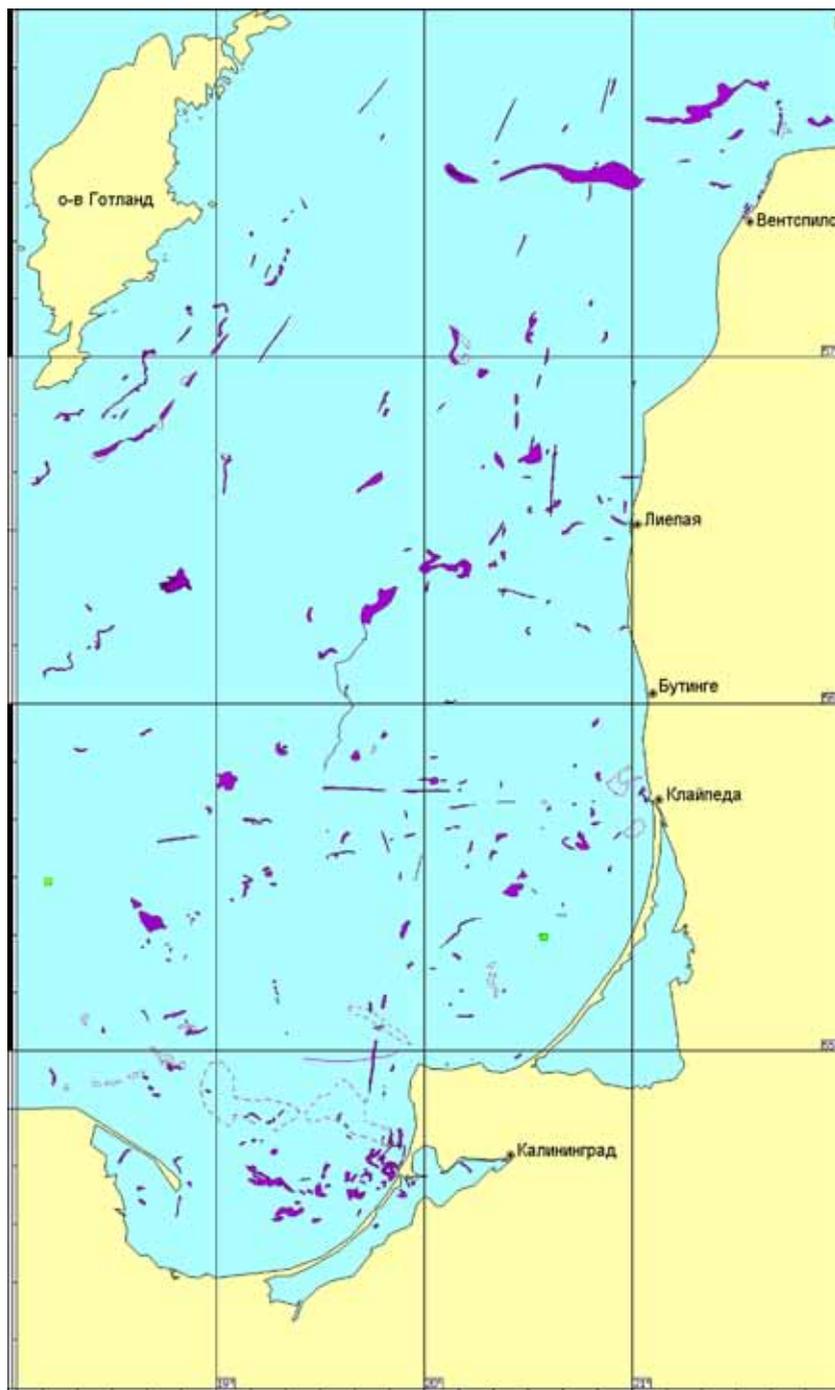


Рис. 3.41. Цветение водорослей 31 мая 2005 г. (©ESA, 2005)



Р и с . 3.42. Карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа РЛИ ASAR Envisat и SAR RADARSAT с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г.

3.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СКАНЕРОВ AVHRR И MODIS В ПРОЦЕССЕ МОНИТОРИНГА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Мониторинг нефтяных загрязнений кроме непосредственной идентификации загрязнений, как правило, осуществляемой с использованием данных радаров с синтезированной апертурой (SAR, ASAR), требует получение дополнительной информации о ветре, характеристиках волнения, температуре и структуре поверхностных мезомасштабных течений для описания проявления, трансформации нефтяных пленок и их распространения. Спутниковые данные сканеров AVHRR и MODIS были использованы для построения карт температуры и оптических характеристик морской поверхности.

3.6.1. Данные AVHRR

Данные сканеров AVHRR, установленных на спутниках серии NOAA (<http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>), позволяют получать информацию о температуре поверхности моря с пространственным разрешением ~ 1 км до 6–8 раз в сутки. В процессе мониторинга использованы два основных источника информации — данные приемной станции МГИ НАНУ (Севастополь, Украина) и данные AVHRR в L1B LAC формате — находящиеся в свободном доступе на сайте NOAA (www.class.noaa.gov). Данные приемной станции МГИ НАНУ обрабатывались в оперативном режиме, а из архива NOAA с задержкой 12–24 часа. Данные из обоих источников проходили дальнейшую обработку по единой технологической цепочке после трансформации данных L1B LAC в формат приемной станции МГИ НАНУ. Описание основных этапов обработки данных сканера AVHRR приведены ниже (см. схему на рис. 3.43).

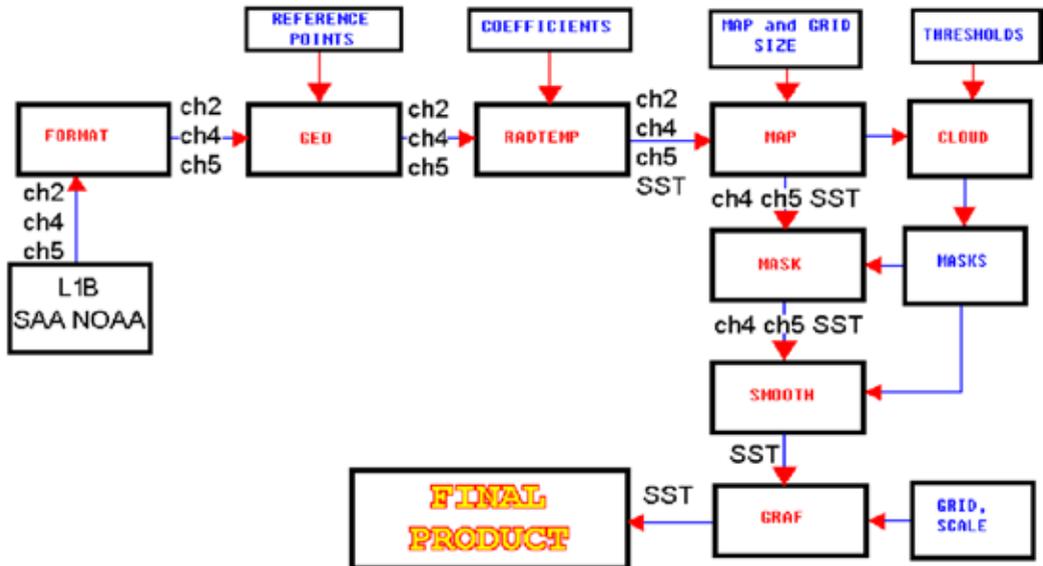


Рис. 3.43. Последовательные процедуры обработки данных AVHRR NOAA

1. Преобразование формата L1B LAC в формат МГИ (модуль FORMAT).

2. Интерактивная географическая привязка (модуль GEO). На этапе интерактивной географической привязки проводится расчет оптимальных орбитальных параметров положения спутника при известной геометрии сканирования прибора. Положение опорных точек вводится оператором с дисплея. Углы тангажа, рыскания и крена рассчитываются путем минимизации невязки положения опорных точек и их отображения на спутниковом снимке. В служебной информации выходного файла записываются полученные значения орбитальных параметров.

3. Радиометрическая коррекция и расчет ТПМ (модуль RADTEMP). На этом этапе для всего снимка проводится пересчет цифровых значений в значения радиационной температуры в каналах и расчет ТПМ по рекомендованным NOAA методикам.

4. Расчет карты ТПМ и интерполяция (модуль MAP). Для расчета задаются шаг по широте и долготе и размеры карты в градусах. Выходная карта в цилиндрической проекции с постоянным шагом по долготе и широте. Для Балтийского моря строились карты для района 53–59° с. ш., 11–23° в. д., и района платформы 54–56,5° с. ш., 18–21,5° в. д. При расчете карты данные из спутникового изображения помещаются в ближайший к каждому элементу узел сетки карты. В результате такой процедуры появляются пропуски информации в расчетной карте для больших углов наблюдения. Пропуски заполняются путем двумерной линейной интерполяции.

5. Выделение облачности (модуль CLOUD). Процедура выделения облачности проводится по пороговому критерию в ИК и оптическом каналах. Наиболее сложная процедура с точки зрения физической адекватности требует дальнейшего исследования и развития.

6. Наложение маски облачности и суши (модуль MASK). Процедура сводится к перемножению элементов матрицы карты на элементы масок суши и облаков. Выходной файл — однобайтный растр со служебной информацией.

7. Применение алгоритма атмосферного сглаживания (модуль SMOOTH). Процедура регрессионного попиксельного расчета ТПМ приводит к существенному мультипликативному увеличению шумов в расчетной карте. Оригинальный алгоритм сглаживания «атмосферной» части уравнения регрессии позволяет эффективно улучшить качество карт ТПМ. В рамках этой процедуры разница между маскированными файлами ТПМ и радиационной температуры в 4-м канале усредняется по скользящему окну 11x11 элементов, результат добавляется к значениям в 4-м канале и маскируется.

8. Наложение графической информации и палитр (модуль GRAF). В рамках этой процедуры на рассчитанную карту накладывается различного рода сопутствующая информация (географическая сетка, шкала температур) и производится сохранение в стандартных форматах для растровых изображений *.vmr или *.rsx, причем rsx-формат сохраняет и всю служебную информацию. Образцы карт для обоих районов представлены на рис. 3.44 (см. с. 188).

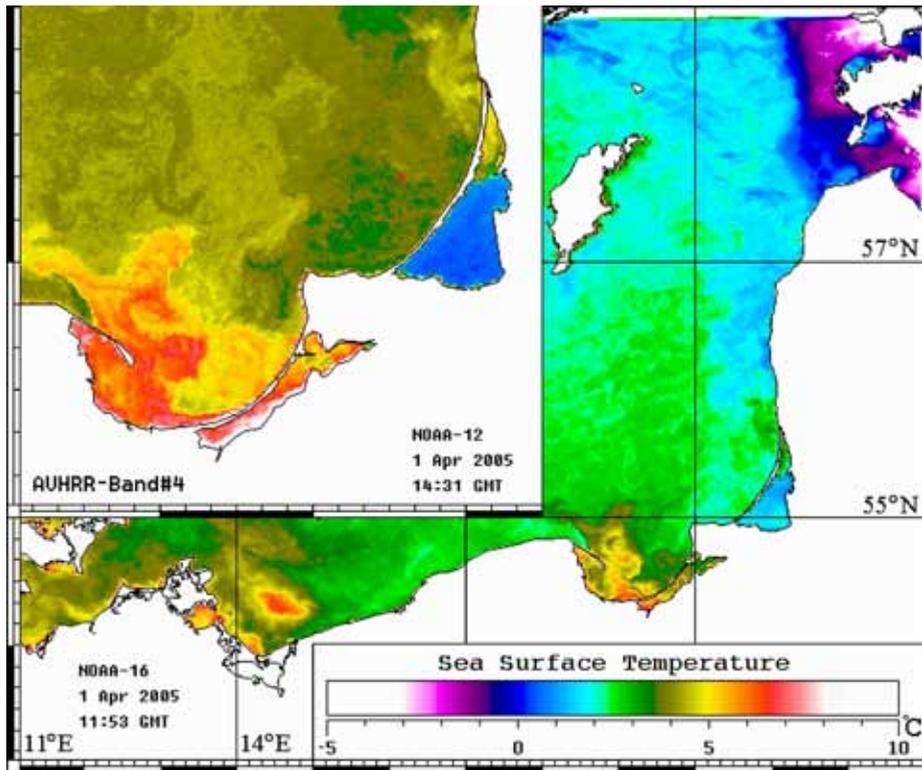
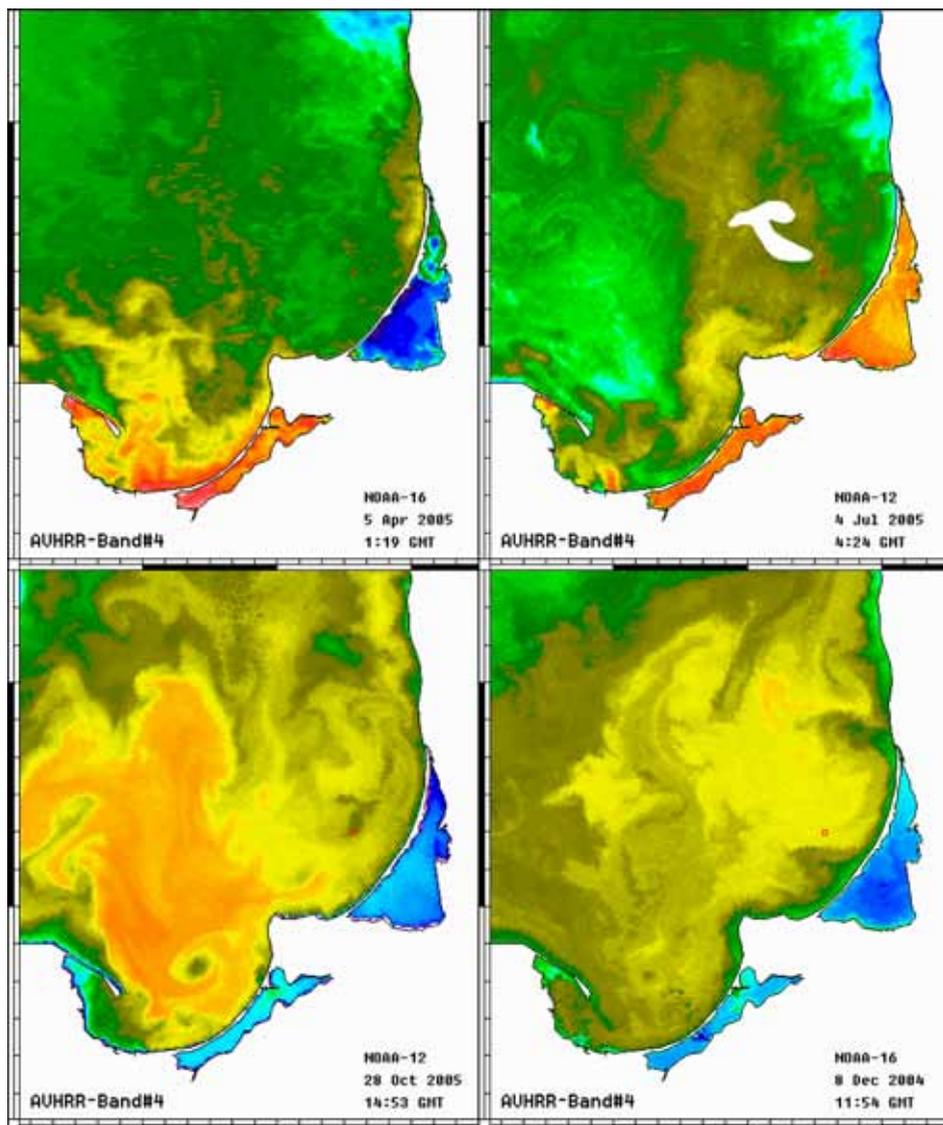


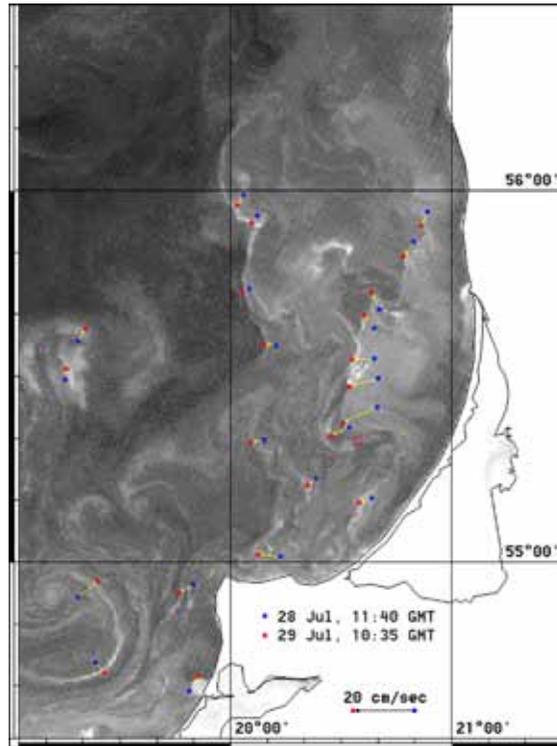
Рис. 3.44. Карты температуры поверхности моря (1 апреля 2005 г.)

Примеры карт температуры для различных сезонов (рис. 3.45, см. с. 189) показывают наличие в структуре поверхностной температуры фронтальных зон, формируемых полем поверхностных течений. Типичные контрасты в таких фронтальных зонах составляют $0,2\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и уверенно отображаются на картах ТПМ. Вихревые образования, апвеллинги и связанные с ними струи существенным образом влияют на транспорт нефтяных пленок и их трансформацию. Современные гидрофизические модели не в состоянии описать движения на масштабах единицы километров, поэтому использование последовательных спутниковых снимков позволяет получить уникальную информацию о поле поверхностных течений и дать инерционный прогноз возможного распространения пленок. Учитывая, что интервал между снимками может составлять от 4 до 24 часов, а пространственное разрешение 1 км, скорости смещения водных масс могут быть оценены с точностью $2\text{--}8\text{ см/с}$. Оценка скоростей проводилась в интерактивном режиме на основе выделения смещения пространственных особенностей в поле ТПМ. Возможно применение автоматизированного расчета скоростей на основе метода максимальной кросс-корреляции (Maximum Cross-Correlation technique), однако полученные результаты могут содержать ошибки (Afanasyev et al., 2002). На рис. 3.46 (см. с. 190) показано распределение поверхностных скоростей в районе платформы, полученное по двум последовательным снимкам за 28 и 29 июля 2004 г.



Р и с . 3.45. Карты температуры поверхности моря
(8 декабря 2004 г., 5 апреля, 4 июля и 28 октября 2005 г.)

Несомненно, важным фактором является возможность совместного использования ASAR/SAR и AVHRR/MODIS данных с целью определения аномалий, связанных с модуляцией поверхностного волнения в конвергентных и дивергентных зонах, а также аномалий в атмосферном пограничном слое (и, соответственно, в сигнале ASAR/SAR), вызванных изменением температуры подстилающей поверхности (Кудрявцев и др., 2003). Всего за период мониторинга в 2004–2005 гг. было обработано, построено и проанализировано более 1000 карт ТПМ.



Р и с . 3.46. Поле течений в районе платформы Д-6 (красный квадрат), восстановленное по последовательности снимков за 28 и 29 июля 2004 г.

3.6.2. Данные MODIS

Анализ спутниковых изображений морской поверхности, полученных спектро радиометрами MODIS Terra и MODIS Aqua, дал возможность выделить основные мезомасштабные структуры, определяющие поле течений в изучаемом районе, а в условиях солнечного блика даже выделять сами нефтяные загрязнения. Учитывая, что пролеты спутников Terra и Aqua над изучаемым районом разнесены на ~2–4 ч, использование данных последовательных пролетов позволило оценить трансформацию и смещение нефтяных пленок по восстановленным полям течений.

Данные MODIS были получены из оперативного архива GSFC DAAC NASA (<http://daac.gsfc.nasa.gov/data/datapool/>) в формате L1B (MOD02QKM, MYD02QKM, MYD02HKM, MOD02HKM) с разрешением 250 и 500 м. Карты для различных оптических каналов строились для районов, упомянутых выше, при помощи программы BEAM. Рассчитанные карты трансформировались в формат МГИ и на них наносилась графическая информация. Были использованы как регистрируемые излучения в отдельных спектральных интервалах, так и комбинированные многоспектральные карты для района исследований с целью наилучшего отображения процессов в поверхностном слое моря.



Рис. 3.47. Вынос и распространение взвеси из устья реки Висла (1 апреля 2005 г., MODIS Aqua)

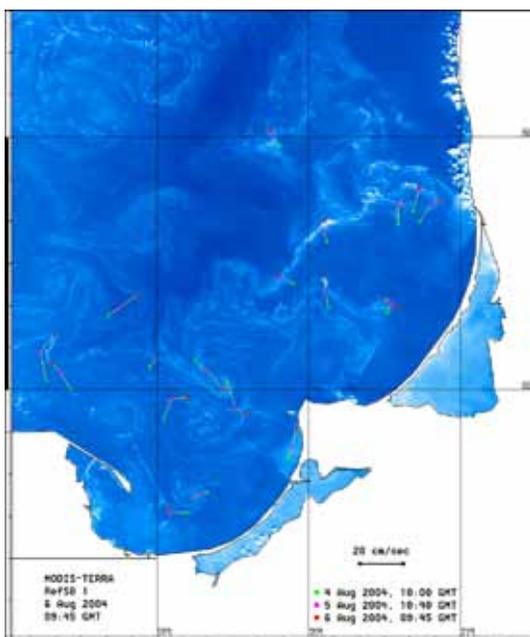
На рис. 3.47 показано композиционное изображение по данным спектро радиометра MODIS на котором хорошо видны мутные воды реки Висла, захватываемые системой вихревых образований и формирующие обширную область, распространяющуюся как на восток, так и на запад от устья. Интенсивное цветение сине-зеленых водорослей в летнее время выступает в качестве хорошо регистрируемого трассера, отображающего положение конвергентно-дивергентных зон и, соответственно, структуру течений.

Отображение конвергентных зон в виде более светлых полос (сильнее рассеивающих) на рис. 3.48 (см. с. 192) позволяет выделить сложную структуру вихревых образований и струй. Анализ последовательных снимков позволяет построить пространственное распределение скоростей течений и прогнозировать возможное перемещение загрязнений, не регистрируемых непосредственно на оптических изображениях. На рис. 3.49 (см. с. 192) в качестве примера дано регистрируемое смещение пространственных неоднородностей в поле цветущего фитопланктона.

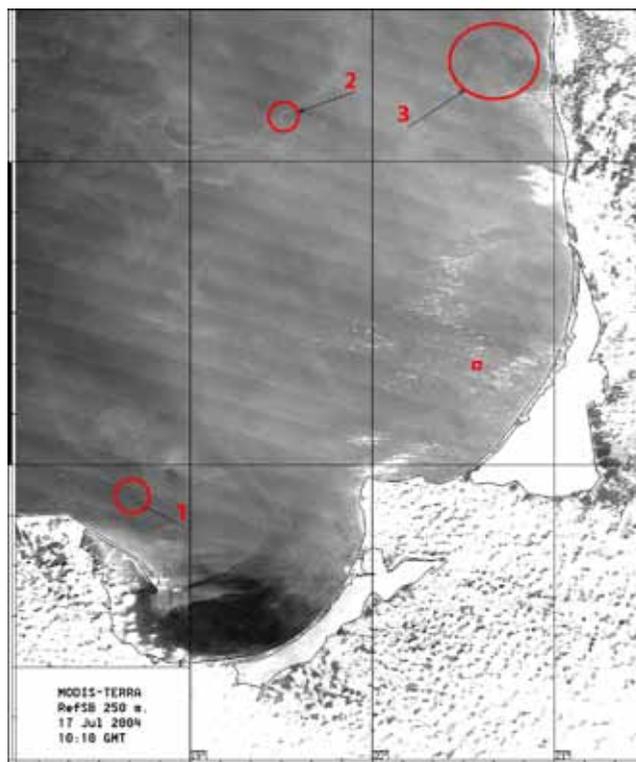
В ряде случаев обширные загрязнения могут быть непосредственно зарегистрированы на снимках спектро радиометра MODIS в зоне солнечного блика, где сигнал формируется в основном неоднородностями шероховатости морской поверхности. Отметим, что благодаря этому эффекту было получено большое количество ежедневных спутниковых изображений нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе после аварии на нефтедобывающей платформе в конце апреля 2010 г. (Лаврова, Костяной, 2010). На рис. 3.50 (см. с. 193) показаны зоны загрязнения (в виде более темных пятен) нефтяными пленками: район 1 — три отдельных пятна, район 2 — след за движущимся судном (судно — более светлое пятно), район 3 — нефтяные загрязнения при выходе из порта Лиепая.



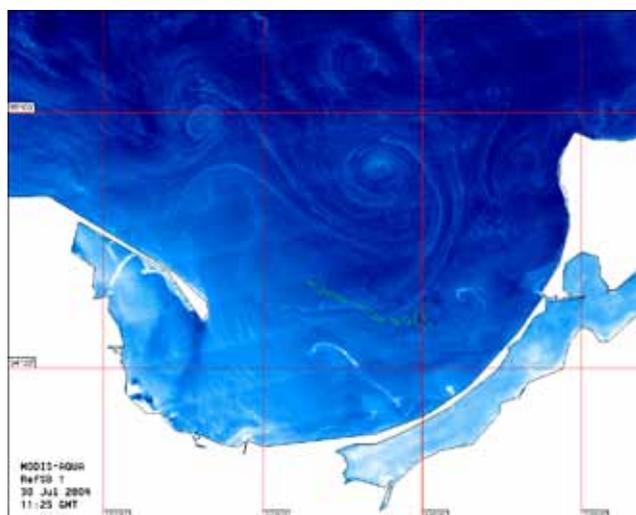
Р и с . 3.48. Структура течений, наблюдаемая благодаря цветению вод (28 июля 2004 г., MODIS Aqua)



Р и с . 3.49. Структура, направление и скорость течений, наблюдаемых благодаря цветению вод (4–6 августа 2004 г., MODIS Terra)



Р и с . 3.50. Загрязнения нефтепродуктами, регистрируемые на снимках MODIS в зоне солнечного блика (17 июля 2004 г., MODIS Terra)



Р и с . 3.51. Структура течений и цепочка нефтяных пятен, зарегистрированных на MODIS Aqua (30 июля 2004 г. 11:25 GMT) и на ASAR Envisat (контур пятен на 20:08 GMT)

Удачный пример отображения загрязнений на морской поверхности приведен на рис. 3.51 (см. с. 193) — карте по данным MODIS. Контурами нанесено положение зарегистрированных пятен по данным ASAR Envisat за 30 июля 2004 г. 20:08 GMT, т.е. приблизительно через 9 часов после пролета MODIS Aqua. На самом изображении сканера хорошо выделяются темные области (с меньшей шероховатостью) северо-восточнее нефтяных пятен, зарегистрированных на ASAR Envisat. По данным MODIS Aqua видно, что загрязнения находятся на периферии антициклонического вихря и распространяются в юго-западном, западном направлении со скоростями 15–20 см/с. Разрывность регистрируемых пятен может быть обусловлена конвергентно-дивергентными течениями, модулирующими концентрацию ПАВ. Таким образом, совместное использование данных оптических и тепловых сканеров позволяет получать информацию о мезомасштабных процессах и связанных с ними полях скоростей поверхностных течений, осуществлять инерционный прогноз возможного распространения загрязнений, а также в ряде случаев проводить непосредственную регистрацию проявлений нефтяных пленок.

3.7. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН

3.7.1. Прогноз дрейфа обнаруженных нефтяных пятен

На основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии рассчитывался прогноз дрейфа всех крупных нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках ASAR Envisat в юго-восточной Балтике, и виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6. Этот ежедневный прогноз позволял планировать и корректировать действия по ликвидации нефтяного загрязнения в результате потенциально возможной аварии на нефтяной платформе Д-6 и оперативно делать оценки экологических рисков, связанных с загрязнением нефтью акватории моря и побережья Куршской косы.

Модель Seatrack Web — это уникальная европейская модель, позволяющая рассчитывать по всей акватории Балтики дрейф и трансформацию пятен различных типов нефтепродуктов на 5 суток вперед (на 48 часов в 2004–2005 гг.) с пространственным разрешением 1 миля (3 мили в 2004–2005 гг.) и временным разрешением 1 час (3 часа в 2004–2005 гг.), с учетом обновляющегося прогноза поля ветра (и ряда других метеорологических параметров) и течений каждые 3 часа. Она основана на европейских оперативных атмосферных моделях ECMWF и HIRLAM и гидродинамической модели HIROMB. Кроме того, она включает в себя модель трансформации и дрейфа пятен нефтепродуктов различного типа, объема и состояния. Помимо положения пятна, рассчитывается его состояние на каждый час — координаты, размер, скорость и направление дрейфа, объем смеси с водой, процент испарившейся, диспергированной, осадившейся нефти, воды в смеси. Она также позволяет восстанавливать историю дрейфа пятен до 30 суток назад.

Именно эта модель используется ХЕЛКОМом для оперативного прогноза дрейфа нефтяных загрязнений на акватории Балтики и установления виновников загрязнений,

благодаря встроенной оперативной системе автоматической идентификации судов (Automatic Identification System, AIS). Эта модель сегодня активно используется в Швеции, Дании, Финляндии, Польше, Эстонии, Латвии, Литве и России (*Ambjörn*, 2004, 2006; *Kostianou et al.*, 2007a, 2008). Модель позволяет делать оценки рисков загрязнения нефтепродуктами акватории и береговой зоны от разных источников (*Kostianou et al.*, 2007a, 2008). Следует отметить, что в Балтийском море существует более 60 морских охраняемых зон.

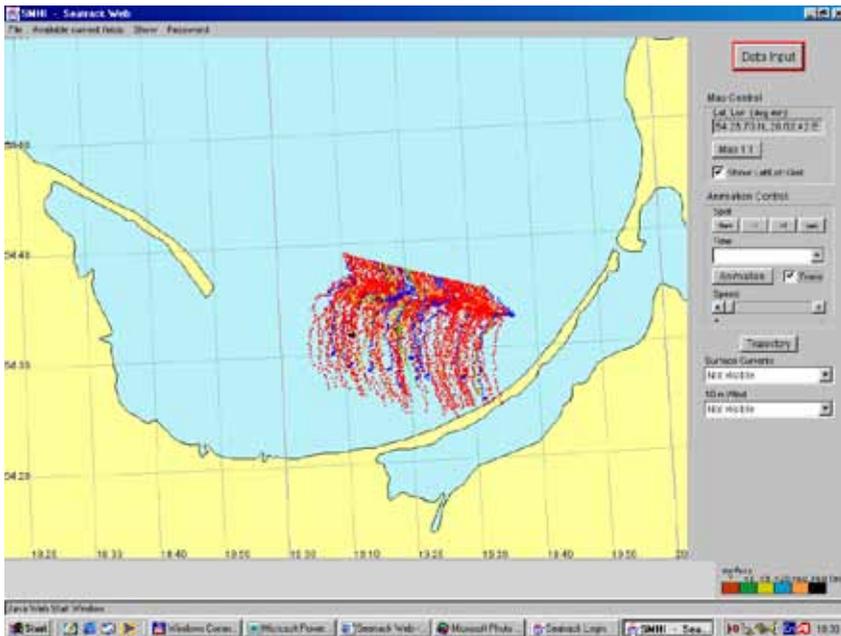
Модель разрабатывалась и модифицировалась с 1995 г. Федеральным морским и гидрологическим агентством (Гамбург, Германия, Federal Maritime and Hydrological Agency) и Шведским институтом метеорологии и гидрологии (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). В 1998 году к работе над моделью присоединилась Датская королевская администрация по навигации и гидрографии (Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography), в 2003 году — Финский институт окружающей среды (Finnish Environment Institute). В работе над моделью принимают участие также:

- Шведский королевский институт технологий в Стокгольме (Royal Institute of Technology, Department of Numerical Analysis and Computer Science).
- Национальный суперкомпьютерный центр в Линкопинге, Швеция (National Supercomputer Centre).
- Институт численного анализа в Стокгольме (Institute for Numerical Analysis (part of the Center for Parallel Computers) at Kungliga Tekniska Högskolan).
- Институт вычислительной математики в Брауншвейге, Германия (Institute of Scientific Computing in Technical University Braunschweig).
- Отдел вычислительной математики в Университете Упсала, Финляндия (Department of Scientific Computing, Uppsala University).
- Морской институт в Гданьске, Польша (Maritime Institute).

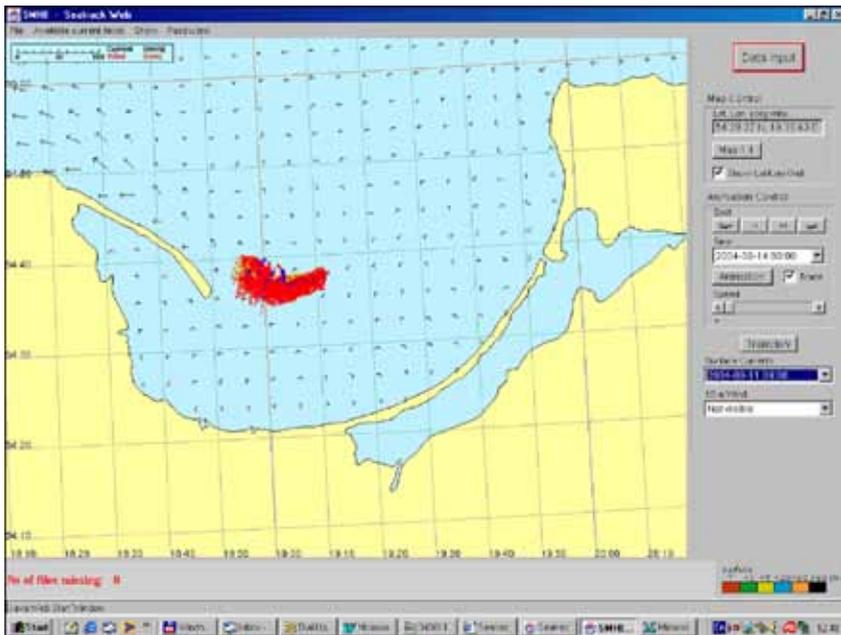
Расчет ведется на суперкомпьютерах SGI Origin 3800 (33 процессора) и CRAY T3E-600 (216 процессоров, одна из последних версий CRAY). Пространственное разрешение модели составляет 3 мм с 1995 г., с 2002 г. — 1 мм, при этом численная сетка имеет 1 121 746 активных точек, из которых 144 449 — на поверхности моря. Модель имеет 24 слоя толщиной от 4 м у поверхности до 60 м у дна. Шаг по времени составляет 10 мин.

Модель сопряжена с оперативной атмосферной моделью HIRLAM (разрешение 22 км), которая дает атмосферное давление, скорость и направление ветра, влажность и температуру воздуха у водной поверхности, облачность 4 раза в день. Ветровое волнение задается моделью NYPAS. Кроме того, используется приливная модель, и задается уровень моря на входе в Балтийское море из Северного моря. Пресноводный сток дается по 82 рекам.

Благодаря эксклюзивному круглосуточному доступу к модели Seatrack Web через Интернет, имелась уникальная возможность ее использования для оценки экологических рисков, связанных с эксплуатацией нефтяной платформы Д-6, и для прогноза дрейфа нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ. Чрезвычайно важным моментом в процессе мониторинга являлся тот факт, что Seatrack Web — модель, официально признанная и используемая ХЕЛКОМ для оперативного прогноза дрейфа нефтяных загрязнений на акватории Балтики.



Р и с. 3.52. Траектория дрейфа цепочки нефтяных пятен по результатам численного моделирования (Seatrack Web, SMHI) с 30 июля по 3 августа 2004 г.

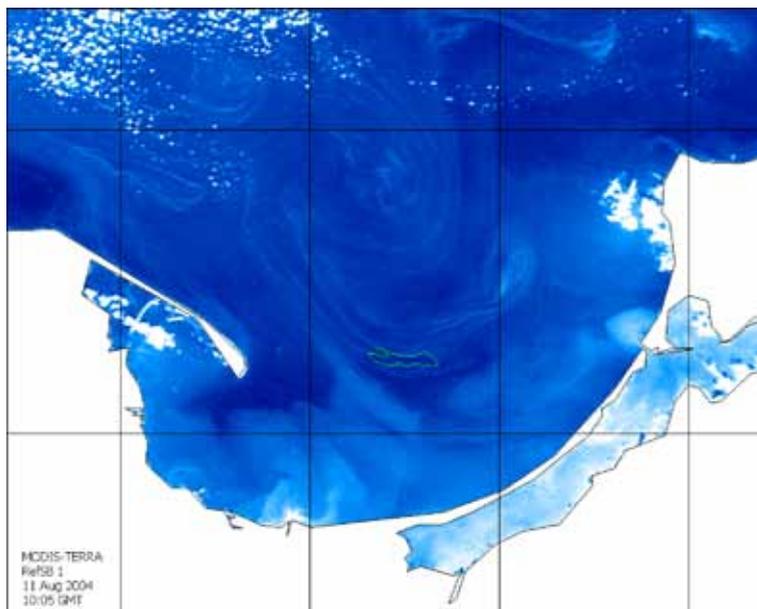


Р и с. 3.53. Численный прогноз дрейфа пятна с 11 августа (9:06 GMT) по 14 августа (00:00 GMT) 2004 г., выполненный на основе модели Seatrack Web, SMHI

Приведем несколько примеров моделирования дрейфа нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ.

30 июля 2004 г. в Гданьском заливе была обнаружена цепочка нефтяных пятен (см. рис. 3.29а, 3.51). Численное моделирование дрейфа цепочки пятен с момента обнаружения и до 00:00 UTC 3 августа показало дрейф размывающихся пятен на юг (рис. 3.52, см. с. 196), что не соответствовало действительности, поскольку модель не всегда разрешает мезомасштабные особенности динамики вод, такие как вихри, дипольные структуры, струи и пр., выявляемые на ИК и оптических спутниковых изображениях. Как показали именно эти спутниковые изображения, дрейф происходил на северо-запад практически вдоль линий тока антициклонического вихря (см. рис. 3.29а, 3.51). Некоторое несовпадение объясняется разницей в 10 часов между спутниковым изображением MODIS Aqua (утро) и ASAR Envisat (вечер), на котором и были обнаружены пятна нефти. Дальнейшее движение пятен зависело от интенсивности самого антициклонического вихря и смещения самого диполя, который с 28-го по 30 июля провернулся в антициклоническом направлении (по часовой стрелке) на юг на 90 градусов.

Численное моделирование дрейфа и трансформации пятна нефти, обнаруженного 11 августа 2004 г. в 9:06 GMT, под действием прогнозируемого ветра и течений на период до 14 августа показало, что оно будет дрейфовать сначала в западном направлении, а затем должно перемещаться вдоль косы Хел на северо-запад, если к тому времени кардинально не изменится поле ветра и течений (рис. 3.53, см. с. 196). Такая картина дрейфа пятна очень хорошо соответствовала наблюдаемой мезомасштабной динамике вод в Гданьском заливе (рис. 3.54).



Р и с . 3.54. Спутниковое изображение MODIS Terra Гданьского залива в оптическом диапазоне 11 августа 2004 г. (10:05 GMT) с нанесенным контуром нефтяного пятна



Рис. 3.55. Фрагмент SAR ERS-2 изображения с нефтяным пятном, обнаруженным 13 декабря 2004 г. (©ESA, 2004)

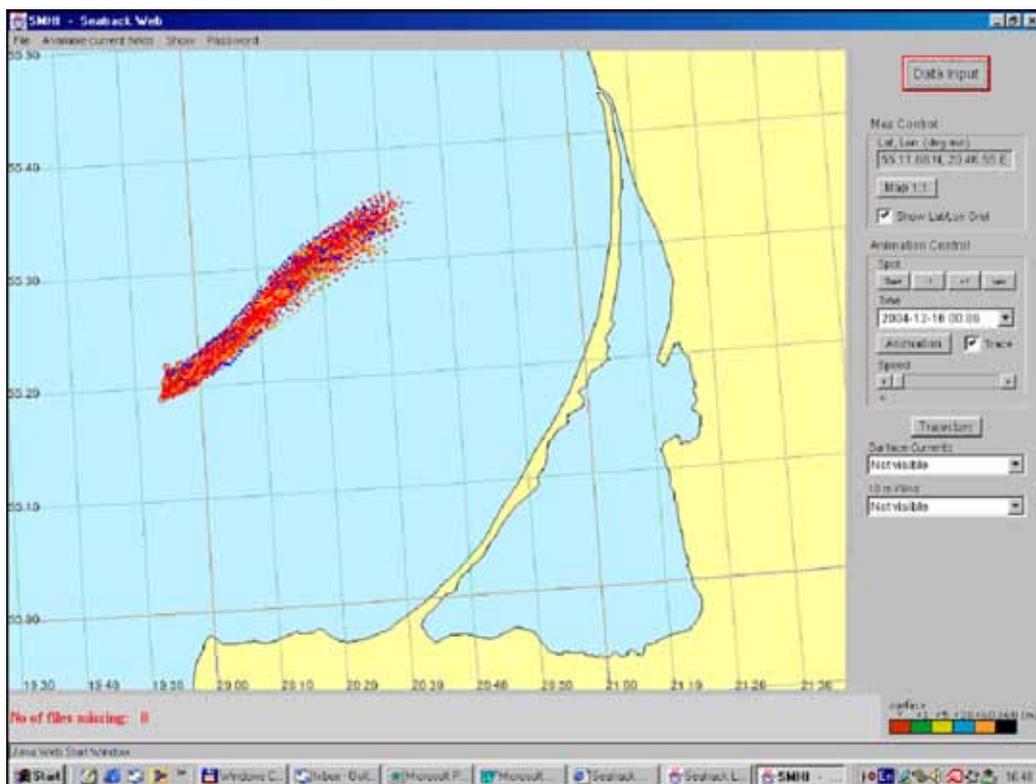


Рис. 3.56. Прогноз дрейфа пятна с 13 декабря до 00:00 UTC 16 декабря 2004 г.

13 декабря 2004 г. в 42 км к западу от платформы Д-6 было обнаружено остаточное нефтяное пятно, образовавшееся в результате утечки нефтепродуктов с судна. Его координаты: 55,368° с.ш., 19,943° в.д. (северный конец); 55,320° с.ш. 19,906° в.д. (южный конец). Общая протяженность 5240 м. Никакого корабля, который мог бы стать причиной разлива нефтепродукта, на снимке не наблюдалось. Общая площадь пятна составляла более 7 км². На рис. 3.55 (см. с. 198), являющимся фрагментом РЛИ, полученного со спутника ERS-2 через 30 минут после РЛ-съемки с Envisat, это пятно представлено с разрешением 25 м. Оно имеет вытянутую, характерную для судового следа, форму, размываемую ветром и течениями.

На основе полученных данных был произведен расчет траектории дрейфа пятна на 3 суток вперед до 00:00 UTC 16 декабря 2004 г. Прогноз показал, что пятно будет распространяться на северо-восток со средней скоростью 21 см/с и к 16 декабря может достигнуть района 55° 35' с.ш. и 20° 30' в.д. (рис. 3.56, см. с. 198), если к тому времени не будет размыто в результате действия ветра и волн.

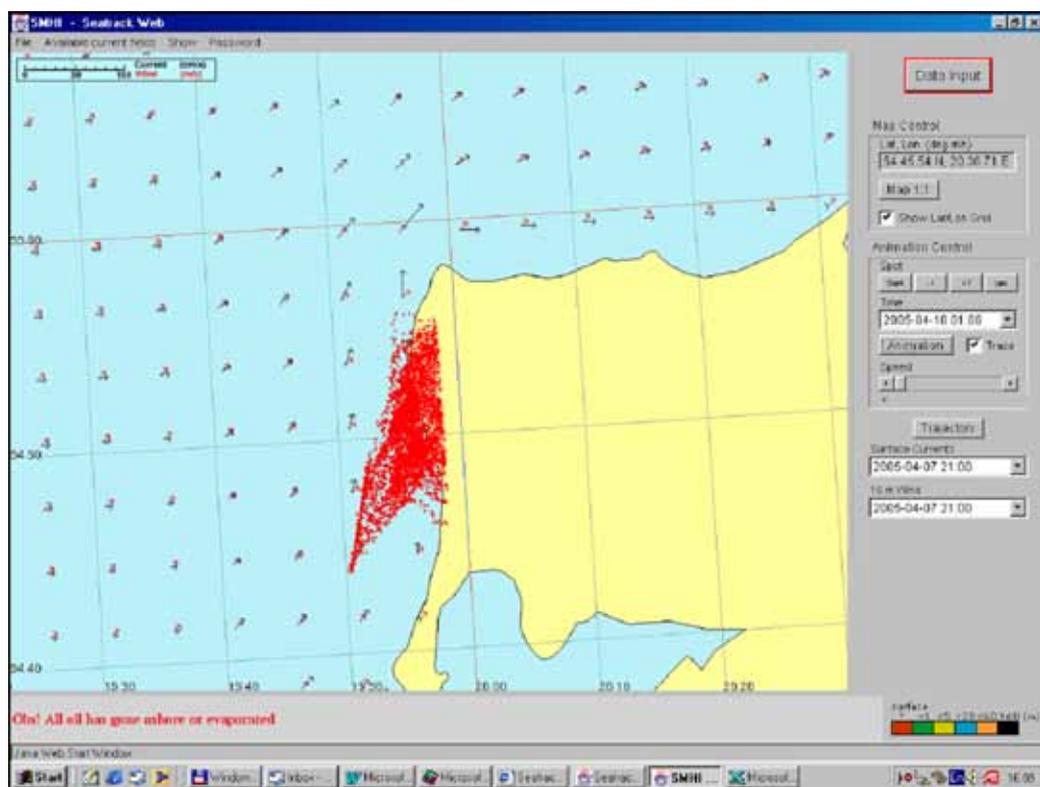


Рис. 3.57. Численное моделирование дрейфа пятна с 7 апреля (20:19 GMT) по 11 апреля (00:00 UTC)

Вечером 7 апреля 2005 г. севернее выхода из Балтийского канала на РЛИ отчетливо проявилось темное пятно, зарегистрированное и на утреннем снимке, и которое с большой вероятностью можно отнести к нефтяному загрязнению (см. рис. 3.28). По сравнению с изображением, полученным утром, было отмечено небольшое растекание в северо-восточном направлении, что хорошо согласовывалось с направлением приповерхностного ветра и поверхностного волнения. Координаты пятна: $54,81^\circ$ с.ш., $19,87^\circ$ в.д. — северная оконечность, $54,731^\circ$ с.ш., $19,84^\circ$ в.д. — южная оконечность. Протяженность пятна — порядка 8,5 км, общая площадь — $3,8 \text{ км}^2$. Численное моделирование дальнейшего дрейфа пятна показало, что уже 8 апреля к 10 часам (GMT) пятно частично должно достичь берега Самбийского полуострова в районе Янтарного, а к вечеру 9 апреля могло быть полностью вынесено на берег полосой около 15 км от $54^\circ 47'$ до $54^\circ 55'$ с.ш. (рис. 3.57, см. с. 199). К счастью, по ряду причин загрязнения береговой полосы не произошло.

3.7.2. Прогноз дрейфа нефтяных пятен с платформы Д-6

Ежедневно делался численный прогноз на 48 часов распространения нефтяного пятна (траектория движения) в случае аварийного разлива нефти объемом 10 м^3 на платформе Д-6. В табл. 3.5 (см. с. 201) представлены характеристики модели и модельной ситуации.

На рис. 3.58 (см. с. 202) представлены примеры численного моделирования дрейфа пятен в период с 23-го по 30 октября 2005 г. Сильная изменчивость скорости и направления их дрейфа связана с большой изменчивостью как поля ветра, так и результирующих течений в этой мелководной части моря. Это лишний раз подтверждает необходимость использования оперативных данных в численном моделировании, а не среднеклиматических характеристик гидрометеорологических условий.

Статистика ежедневных прогнозов дрейфа нефтяных пятен с платформы Д-6 за июль-декабрь 2004 г. показала ареал распространения и потенциальную вероятность (%) нахождения пятна в любой точке акватории и направление его дрейфа в течение 48 часов после аварийного разлива нефти объемом 10 м^3 (рис. 3.59, см. с. 203 и 3.60, см. с. 203). На сектор (150°), направленный на Куршскую косу, приходится 67 % вероятных дрейфов пятен, причем только в половине этих случаев (35 %) пятна могли достичь береговой линии, что объяснялось интенсивным вдольбереговым течением.

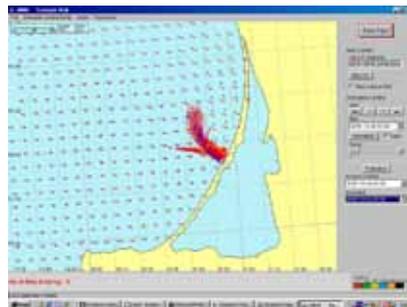
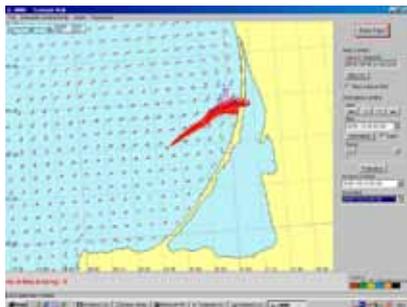
Разработанная методика позволяет ежедневно корректировать план работ по ликвидации потенциально возможной аварии (утечка нефти) на платформе Д-6 или на подводном нефтепроводе, что в случае реальной чрезвычайной ситуации даст ощутимый эффект в скорости и правильности принимаемых решений по ликвидации последствий аварии и защите побережья Куршской косы или Самбийского полуострова.

Аналогичную работу можно было бы проводить и для моделирования потенциально возможной утечки нефти из нефтепровода, соединяющего нефтяную платформу с берегом.

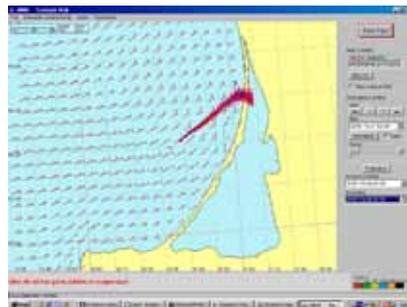
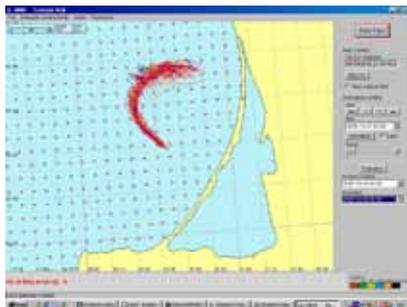
Т а б л и ц а 3.5. Характеристики модельной ситуации

Модель	Численная интерактивная модель дрейфа нефтяных пятен в Балтийском море (Seatrack Web) Шведского института метеорологии и гидрологии
Пространственное разрешение	3 морские мили
Тип расчета	Дрейф пятна нефтепродуктов
Тип нефтепродукта	Fuel oil N2
Прогноз	На 48 часов, начиная с 00:00 UTC каждых суток в период с 23-го по 30 октября 2005 г.
Время начала расчета (сброса)	00:00 UTC каждых суток (дата в формате D6-YYMMDD указана над каждым рисунком)
Шаг по времени	3 часа
Координаты источника (платформы)	55° 19,67' с. ш., 20° 34,50' в. д.
Тип сброса	Разовый
Продолжительность сброса	Нет
Скорость сброса	Нет
Объем сброса	10 м ³
Глубина сброса	0 м
Количество точек, описывающих пятно	100
Задаваемый ветер	Из модели погоды HIRLAM (разрешение 22 км, шаг по времени 3 часа)
Ветровой фактор	2 %
Акватория	54° 50'–50° 50' с. ш., 19° 30'–21° 10' в. д.
Визуализация дрейфа пятна	«Факел» — траектория движения и расплывания пятна за 48 часов
Поле поверхностных течений (0–4 м)	Представлено на момент сброса (00:00 UTC каждых суток)
Поле ветра (10 м)	Нет
Результаты расчета	Сохранены в файле (состояние пятна на каждые 3 часа: координаты, размер, скорость и направление дрейфа, объем смеси с водой, процент испарившейся, диспергированной, осадившейся нефти, воды в смеси)

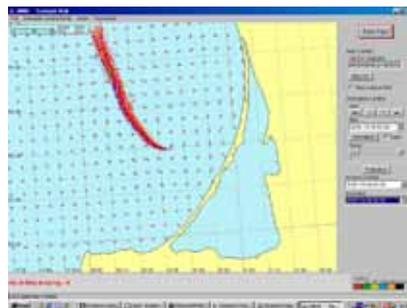
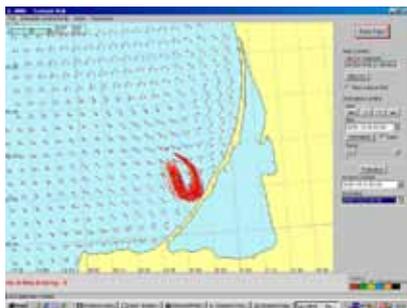
23 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI) 24 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI)



25 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI) 26 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI)



27 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI) 28 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI)



29 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI) 30 октября 2005 г. (© Seatrack Web, SMHI)

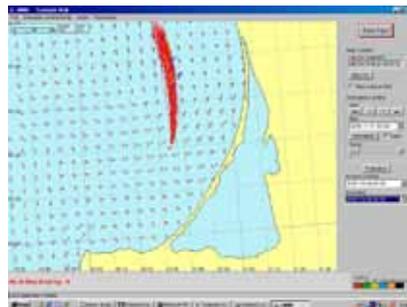
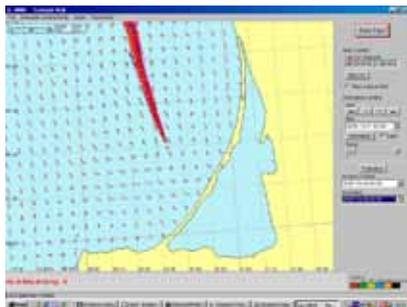
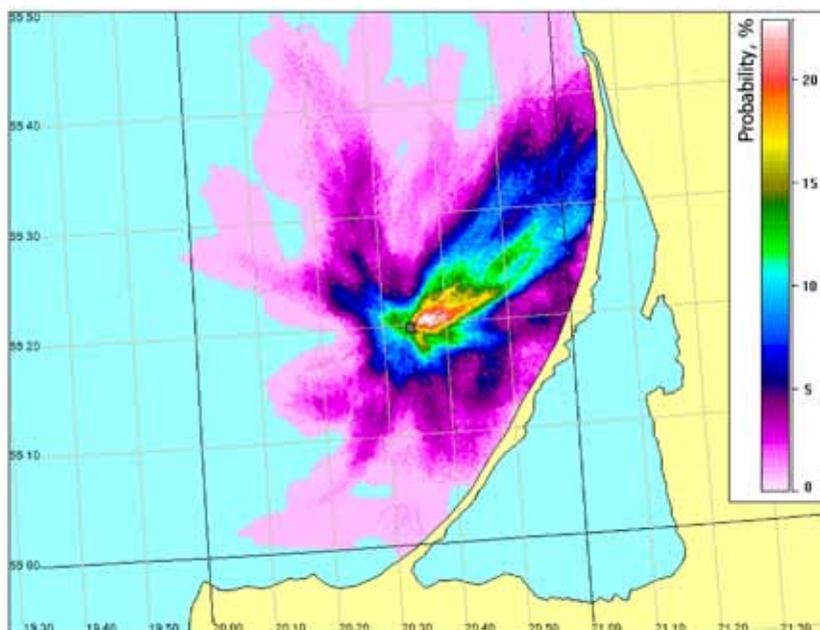
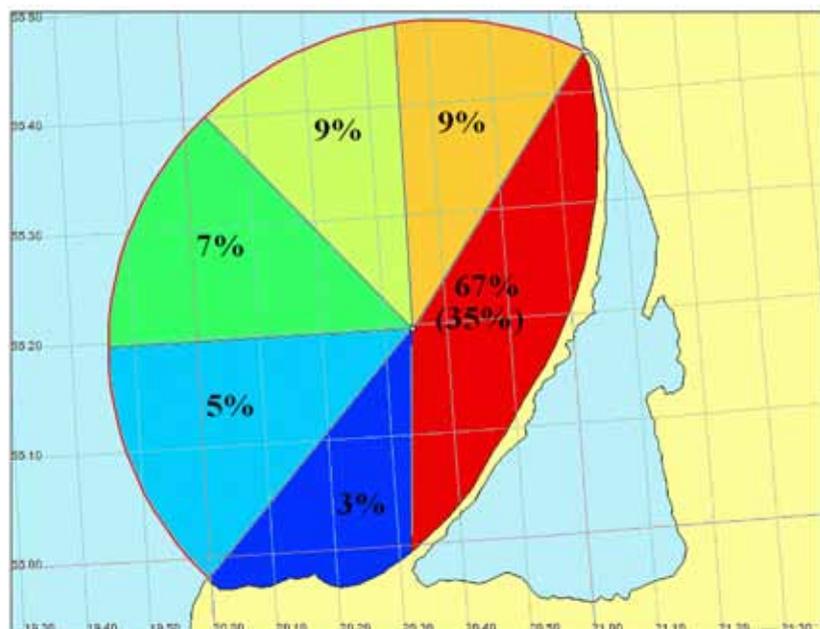


Рис. 3.58. Прогноз дрейфа виртуального пятна с платформы Д-6 за 23–30 октября 2005 г.



Р и с . 3.59. Вероятность распространения (%) в течение 48 часов потенциального нефтяного загрязнения с платформы Д-6



Р и с . 3.60. Вероятность распространения в течение 48 часов потенциального нефтяного загрязнения с платформы Д-6 в соответствующих секторах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всего с 1 июля 2004 г. по 30 ноября 2005 г. было получено, обработано и проанализировано 230 радиолокационных изображений ASAR со спутника Envisat Европейского космического агентства и 17 радиолокационных изображений SAR со спутника RADARSAT Канадского Космического Агентства, на которых в общей сложности было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов на поверхности юго-восточной части Балтийского моря. За весь период наблюдения ни одного пятна, исходящего от платформы Д-6, обнаружено не было, что подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности на платформе. Массив пятен четко вырисовывает пути движения судов в юго-восточной части Балтийского моря, направленные к Вентспилсу, Лиенае, Клайпеде, Калининграду и вдоль Готланда. Поэтому основными источниками нефтяных загрязнений являются морские суда (*Kostianoy et al.*, 2006a, b; *Kostianoy*, 2008, 2012; *Костяной* и др., 2009; *Kostianoy, Lavrova*, 2012).

В качестве вспомогательной информации, необходимой для анализа радиолокационных изображений и прогноза дрейфа пятен, было получено, обработано и проанализировано около 1600 спутниковых изображений в инфракрасном и оптическом диапазоне со спутников AVHRR NOAA, MODIS Terra/Aqua, построено около 240 карт поля приводного ветра по данным скаттерометра SeaWind со спутника QuikSCAT и 73 карты высоты волн по данным альтиметра Jason-1.

На основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии ежедневно рассчитывался прогноз дрейфа и трансформации нефтяного пятна на 48 часов с шагом 3 часа в случае аварийного разлива нефти объемом 10 м³ на платформе Д-6. Этот ежедневный прогноз позволял заранее планировать и корректировать действия по ликвидации нефтяного загрязнения в результате потенциально возможной аварии на Д-6 и трубопроводе. Кроме того, модель использовалась для прогноза дрейфа всех крупных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках акватории юго-восточной Балтики. Всего было выполнено около 550 прогнозов дрейфа потенциальных нефтяных пятен с платформы Д-6 и реально обнаруженных пятен.

Результаты, полученные в 2004–2005 гг., показали эффективность комплексного спутникового мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики. Наиболее подробно они были изложены в еженедельных отчетах, подготавливаемых в виде цветных иллюстрированных «Морских бюллетеней», оперативно доставляемых в ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть». Этот еженедельный обзор состояния моря составлялся на основе анализа комплексной гидрометеорологической и спутниковой информации и включал следующие разделы.

1. Гидрометеорологические условия за прошедшую неделю. На основе анализа комплексной гидрометеорологической информации и спутниковых снимков морской поверхности в видимом и ИК диапазонах в данном разделе давалось описание гидрометеорологических условий в районе платформы Д-6 и Куршской косы, приводился анализ состояния ледовой обстановки и условий эвтрофикации вод, обозначались наиболее значимые явления, влияющие на динамику вод исследуемого района, а также на условия получения РЛИ морской поверхности.

2. Радиолокационные изображения (ASAR Envisat и SAR RADARSAT) юго-восточной части Балтийского моря за прошедшую неделю. Раздел включал в себя служебную информацию о времени пролетов спутников над заданным районом съемки, границе получаемых кадров и их количестве. Последовательно приводился комплексный экспертный анализ РЛИ, включающий в себя сами снимки с указанием выявленных характерных особенностей РЛИ, описание случаев загрязнения морской поверхности нефтепродуктами с указанием координат, размеров и площадей выделенных участков, прогноз дрейфа обнаруженных нефтяных пятен. Раздел был снабжен увеличенными фрагментами снимков, содержащими более подробное изображение выделенных участков загрязнений.
3. Сводка всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа РЛИ ASAR со спутника Envisat и SAR со спутника RADARSAT начиная с начала проведения работ (сводная карта нефтяных пятен, обновленная данными за прошедшую неделю).
4. Ежедневный прогноз на 48 часов распространения нефтяного пятна (траектория движения) в случае аварийного разлива нефти объемом 10 м^3 на платформе Д-6 за прошедшую неделю (результаты модельных расчетов дрейфа нефтяных пятен, выполненных на основе оперативной численной интерактивной модели Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI)).

Объем «Морского бюллетеня» составлял в среднем 20–25 страниц, в зависимости от количества информативных спутниковых снимков морской поверхности в видимом и ИК-диапазонах, количества РЛИ за прошедшую неделю и количества обнаруженных пятен нефтепродуктов. Всего в 2004–2005 гг. был выпущен 71 бюллетень общим объемом более полутора тысяч страниц.

По итогам комплексного спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря в 2004 г. был подготовлен и издан буклет на русском и английском языках (отчет ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть»), в котором, в частности, было дано описание современного нефтяного загрязнения Балтийского моря; представлены спутники, аппаратура и информация, используемые для комплексного экологического мониторинга; приведена галерея нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках; показаны примеры обработки инфракрасных и оптических изображений AVHRR NOAA и MODIS Terra/Aqua; представлены примеры восстановленных полей течений и результаты совместного анализа радиолокационных изображений ASAR Envisat и оптических MODIS; особое внимание было уделено результатам численного моделирования дрейфа нефтяных пятен и виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6. Этот отчет (*Костяной и др., 2005б*) в виде pdf-файла доступен на веб-сайтах компаний ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» (http://www.lukoil-kmn.com/monitoring_space.phtml) и ОАО «ЛУКОЙЛ» (http://www.lukoil.ru/static_6_5id_2135_.html).

Полученные результаты только в 2004–2006 гг. докладывались на 13 международных конференциях и были опубликованы в многочисленных изданиях, часть из которых приведена в списке цитируемой литературы.

Эта работа была инициирована и поддержана компанией ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть». Авторы выражают благодарность Европейскому космическому

агентству (ESA, <http://www.esa.int/esaCP/index.html>) и Конгсбергским спутниковым службам (KSAT, Тромсе, Норвегия, www.ksat.no/) за получение радиолокационных данных ASAR Envisat (контракт 04-10095-A-C); NOAA (<http://www.noaa.gov/>) и Лаборатории информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН (<http://smis.iki.rssi.ru/>) за предоставление данных радиометра AVHRR; Годдардскому центру космических полетов (Goddard Space Flight Center NASA) за предоставление данных радиометра MODIS (спутники Terra и Aqua) (<http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>); Центру данных по физической океанографии Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (PODAAC, JPL, <ftp://podaac.jpl.nasa.gov>) за предоставление данных спутников QuikSCAT и Jason-1; Шведскому институту метеорологии и гидрологии (<http://www.smhi.se/>) за предоставление оперативного доступа к численной модели дрейфа нефтяных пятен (Seatrack Web model).

Глава 4

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ (2006–2008)

Работы по спутниковому мониторингу северо-восточной части Черного моря проводятся сотрудниками Института космических исследований РАН начиная с 1999 г. До 2009 г. основное внимание уделялось в первую очередь прибрежной зоне в районе Новороссийск-Геленджик (Булатов и др., 2003б; Mityagina et al., 2004; Лаврова и др., 2005; Lavrova, Vocharova, 2006; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008a, b; Литовченко и др., 2007; Бедрицкий и др., 2007; Лаврова, Митягина, 2008; Shcherbak et al., 2008). Мониторинг базировался на изображениях, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на спутниках ERS-2 и Envisat, которые предоставлялись в рамках различных научных проектов Европейского космического агентства. Подспутниковые наблюдения, включающие оптическую съемку с высокого берега и измерения всех необходимых гидрометеорологических параметров, проводились в летне-осенний период на базе Южного отделения Института океанологии им. П. П. Шишова РАН (Лаврова и др., 2005). В августе-сентябре 2004 г. подспутниковые наблюдения были дополнены оптическими наблюдениями с вертолета, осуществлявшимися ГУ «Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей» (Сочи, Россия) (Литовченко и др., 2007).

В период с 2006 по 2008 г. спутниковый мониторинг на регулярной основе проводился совместно с ГУ «НИЦ Планета» (Росгидромет) и Институтом океанологии им. П. П. Шишова РАН. Район исследования расширился на всю акваторию российского сектора Азово-Черноморского бассейна.

Актуальность этих работ обусловлена рядом факторов. Черное и Азовское моря имеют слабый водообмен с Мировым океаном, поэтому загрязнения, попадающие в эти моря, практически в них и остаются. В то же время большую опасность для загрязнения моря представляют объекты интенсивно развивающегося нефтегазового комплекса. На черноморском побережье России расположено несколько крупных нефтяных терминалов (Новороссийск, Туапсе и м. Железный Рог), осуществляющих загрузку крупнотоннажных танкеров. Только через порт Новороссийск ежегодно переправляется 32 млн т нефти, а в ближайшие 10 лет объем перекачки с учетом увеличения экспорта каспийских месторождений и строительство нефтепровода Бургас-Александропулос может увеличиться втрое.

Кроме того, ввод в эксплуатацию в 2002 г. газопровода Россия-Турция «Голубой поток», проектирование строительства газопроводов по дну Черного моря «Голубой поток-2» в Турцию, «Южный поток» в Болгарию, вдоль российского побережья Джубга-Адлер, а также нефтепровода из Грузии в Украину делают задачу мониторинга морской акватории Черного моря крайне необходимой.

К основным источникам антропогенного загрязнения этого района моря также относятся речной сток (на российском побережье Азово-Черноморского бассейна в море впадает 45 малых рек), сточные воды и утечки минеральных и органических веществ из населенных пунктов и промышленных предприятий, а также сбросы с судов (*Фащук, Шапоренко*, 1995; *Kostianoy, Kosarev*, 2008). Повторяемость (в процентах от общего количества съемок района) обнаружения нефтяных пятен интенсивностью более 250 мг/м² в отдельных районах Чёрного моря по данным авиасъемок в 1981–1990 гг. составила в прибрежных водах Крыма — 37 %, в Керченском проливе — 11 %, в прибрежных водах Российской Федерации — 17 %, в прибрежных водах Грузии — 91 % (*Синицына* и др., 1997). Среди природных факторов наиболее значимыми являются биогенные загрязнения, связанные с цветением фитопланктона.

Побережье Азово-Черноморского бассейна является курортной зоной России, где ежегодно отдыхают 10–15 млн человек. Здесь расположены курорты Анапы, Геленджика, Большого Сочи и др. В Сочи проводятся важные международные политические, экономические и культурные форумы, а в 2014 г. город станет столицей XXII Зимних Олимпийских игр (*Костяной* и др., 2009). Перечисленные обстоятельства накладывают повышенные требования к экологии этого региона и, прежде всего, к чистоте прибрежных вод. В связи с этим спутниковый мониторинг загрязнения водной среды, в том числе нефтепродуктами, должен проводиться регулярно, комплексно и в оперативном режиме. Как показали события ноября 2007 г., когда в результате шторма в Керченском проливе затонуло несколько судов и огромная акватория и береговая линия были загрязнены нефтепродуктами, отсутствие такой системы приводит к колоссальным затратам, необходимым для ликвидации последствий таких аварий.

4.1. ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА

Постоянно действующий комплексный спутниковый мониторинг российского сектора Черного и Азовского морей был направлен на решение следующих задач:

- 1) оперативное картирование параметров состояния и загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды и обобщение полученных результатов ежедекадно и за месяц;
- 2) анализ метеорологической обстановки и ее влияния на распространение загрязнений;
- 3) изучение закономерностей прибрежной циркуляции и их влияния на распространение загрязнений;
- 4) выявление различных ситуаций распределения загрязнений в прибрежных водах.

Задачи 2–4 находятся в тесной взаимосвязи, так как загрязнения, попадая в морскую среду, становятся частью этой среды и развиваются вместе с ней под воздействием метеорологических и гидрологических факторов.

4.2. СЕНСОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Успешное решение перечисленных выше задач базировалось на оперативном приеме, обработке и совместном анализе космических изображений в видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра, полученных с помощью различных приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. Ключевым моментом являлось комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК-данные), пространственному разрешению и размерности. Список используемых сенсоров и носителей приводится ниже:

- радиолокаторы с синтезированной апертурой ASAR Envisat, SAR ERS-2 — пространственное разрешение 25–150 м;
- ИК-радиометры AVHRR NOAA — спектральный канал 10,3–11,3 мкм, разрешение на местности около 1 км;
- сканирующие спектрорадиометры MODIS Terra/Aqua — спектральные каналы: 0,622–0,672; 0,546–0,556 и 0,438–0,448 мкм, разрешение на местности 250 м;
- спектрометр MERIS Envisat — 15 спектральных каналов, разрешение на местности 260 м;
- альтиметр-высотомер TOPEX/Poseidon, ERS-2;
- скаттерометр QuikSCAT.

4.3. МЕТОДИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

В рамках выполнения этих работ была создана и внедрена в практику технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды по данным видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов спектра. Технология разрабатывалась на основе модернизации базового программного комплекса обработки спутниковых данных ГУ «НИЦ «Планета» (Асмус и др., 2005). В технологии воплощено сочетание автоматизированных и интерактивных режимов. В автоматизированном режиме осуществлялась предварительная обработка спутниковых изображений (географическая привязка, трансформирование космических изображений в картографические основы, формирование многозональных изображений из различных комбинаций спектральных каналов) и тематическая обработка (распознавание и классификация водных объектов, картографирование температуры морской поверхности, скорости и направления приводного ветра, концентрации хлорофилла-а,

пространственного перемещения водных масс и др.). В интерактивном режиме на основе совместного анализа космических снимков, результатов их автоматизированного распознавания и наземных данных осуществлялось:

- дешифрирование динамических структур (примерного положения Основного черноморского течения (ОЧТ), положения и размеров прибрежных антициклонических вихрей, циклонических вихрей, вихревых диполей и др.) — по данным ИСЗ Envisat, ERS-2, Aqua, Terra, NOAA, «Монитор-Э», TOPEX/Poseidon;
- определение границы распространения взмученных вод речного стока в прибрежной зоне Черного и Азовского морей, с которыми поступает большое количество взвеси, бытовых и промышленных отходов и загрязнений — по данным ИСЗ Envisat, ERS-2, Aqua, Terra, «Монитор-Э»;
- определение параметров загрязнения (пленок нефтяных загрязнений, пленок поверхностно-активных веществ биогенного происхождения и др.) — по данным ИСЗ ERS-2 и Envisat.

Для анализа гидрометеорологической обстановки использовались данные наземных наблюдений метеорологических станций Сочи, Туапсе, Новороссийск, Анапа, Керчь и Ростов-на-Дону.

Функциональная схема получения информационной продукции о загрязнении водной среды по данным спутникового мониторинга представлена на рис. 4.1 (см. с. 211).

Помимо выявления районов загрязнения водной поверхности регулярно определялись:

- процессы, проявляющиеся в поле цвета или температуры моря и влияющие на перенос взвеси и загрязнений, например, температурные фронты и апвеллинги (по данным ИСЗ Монитор-Э, Aqua, Terra и NOAA);
- распределение хлорофилла-*a* (по данным ИСЗ Aqua);
- скорость приводного ветра (по данным ИСЗ QuikSCAT);
- колебания уровня моря (по данным ИСЗ TOPEX/Poseidon и Jason).

В ходе мониторинга состояния природной среды российского сектора Азовского и Черного морей в 2006–2008 гг. было получено, обработано и проанализировано более 3300 космических изображений в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра с девяти спутников, применяемых для дистанционного зондирования Земли. Ежедневно производилось 12 видов оперативной спутниковой информационной продукции:

- 1) карты состояния водной среды, совмещенные с цветосинтезированными изображениями, полученными по данным комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) «Метеор-М» № 1, спектрорадиометров MODIS Terra/Aqua и MERIS Envisat;
- 2) карты состояния морской поверхности, совмещенные с ИК-изображениями, полученными по данным многозонального сканирующего устройства МСУ-МР «Метеор-М» № 1 и радиометра AVHRR NOAA;

Продолжение текста на с. 224

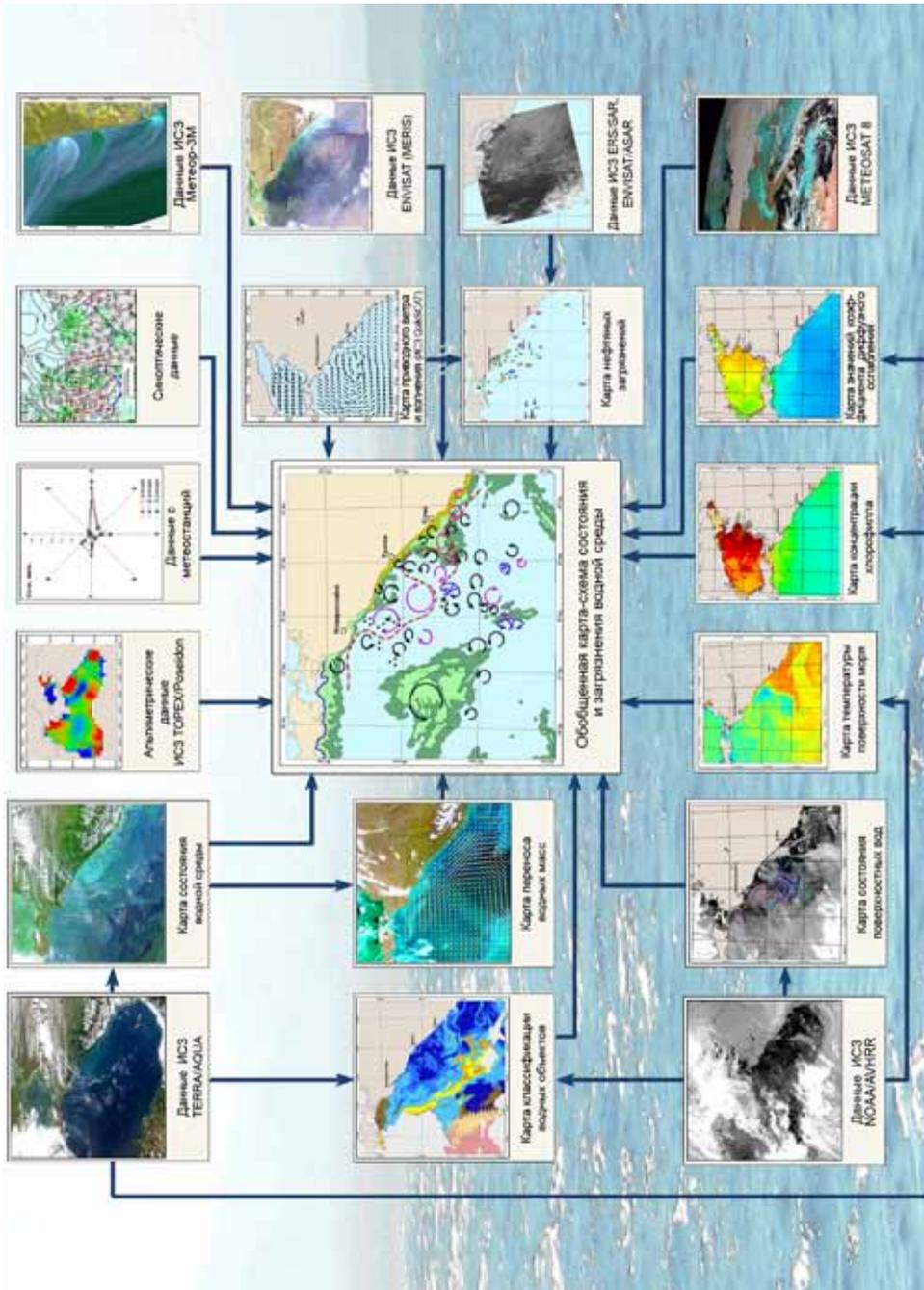
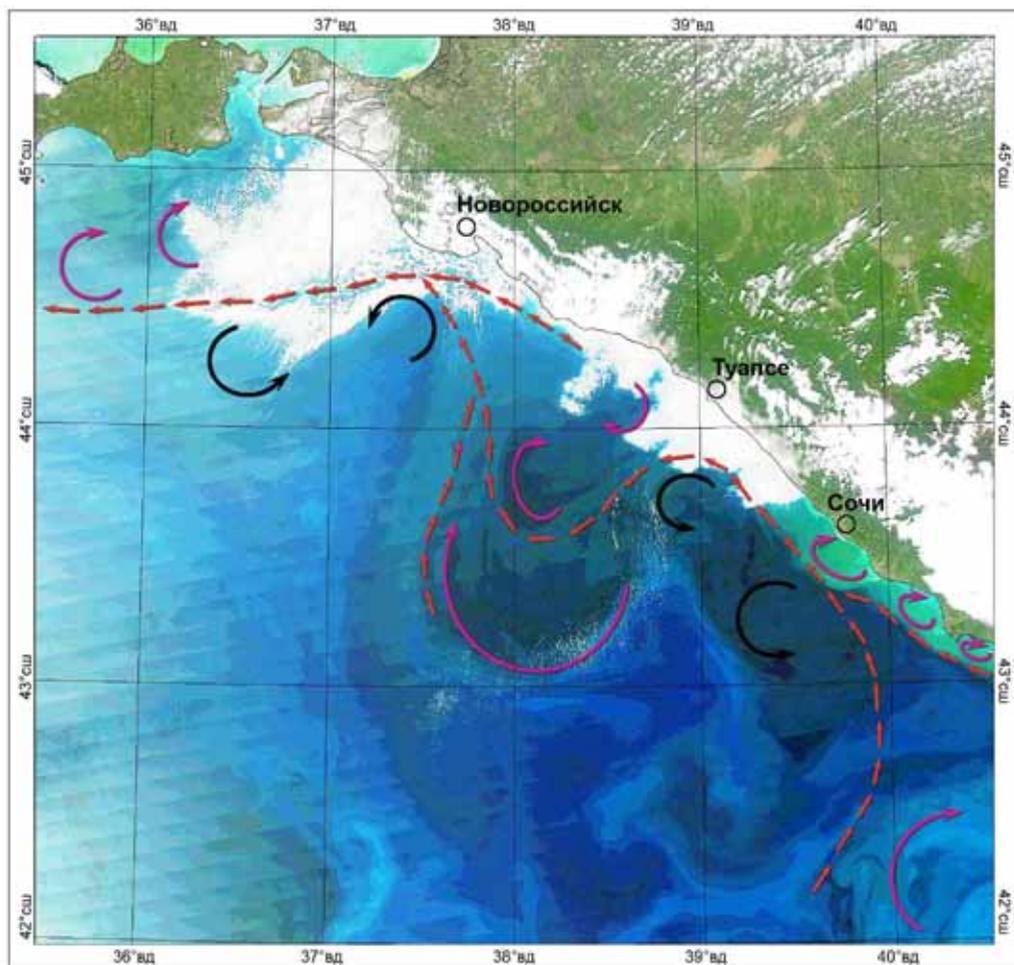


Рис. 4.1. Принципиальная схема комплексного использования спутниковых данных для мониторинга состояния и загрязнения водной среды (© ГУ «НИЦ «Планета»)

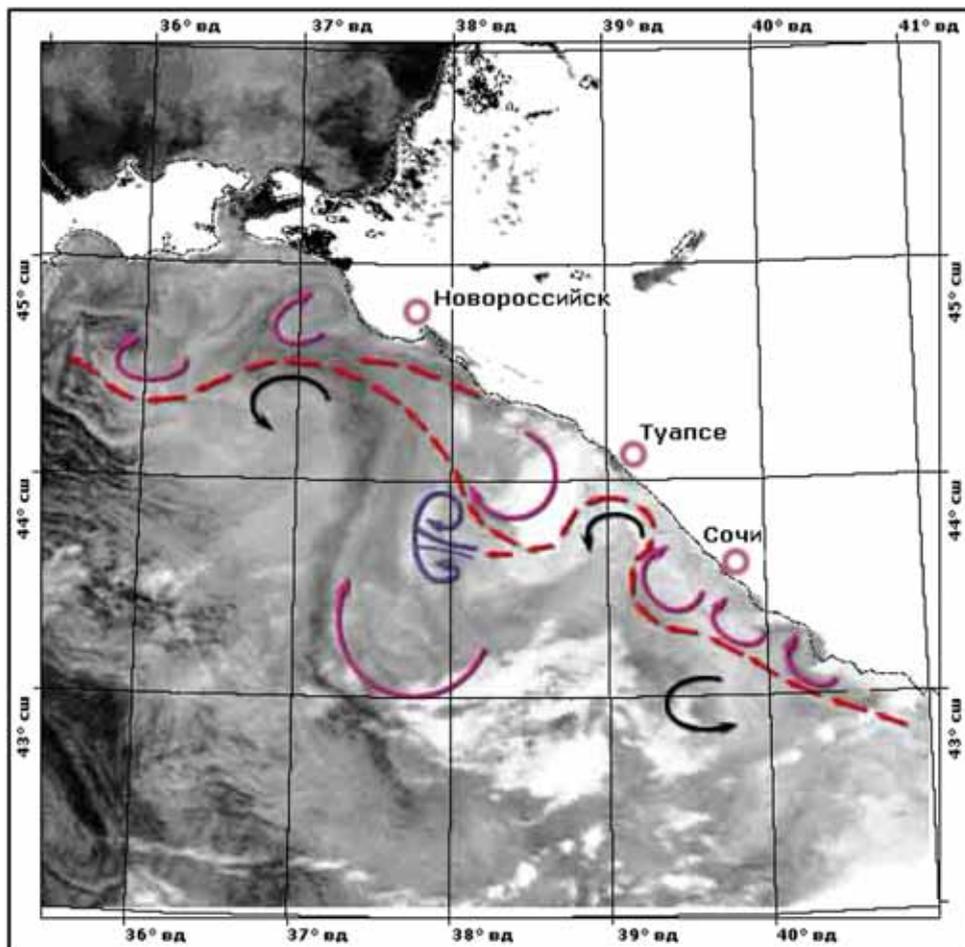


ИСЗ AQUA, MODIS, разрешение 250 м, 14.05.08 10:36

спектральные каналы R: 0,620-0,670 мкм (1); G: 0,545-0,565 мкм (4); B: 0,459-0,479 мкм (3)

-  - примерное положение Основного черноморского течения
-  - прибрежные антициклонические вихри
-  - циклонические вихри

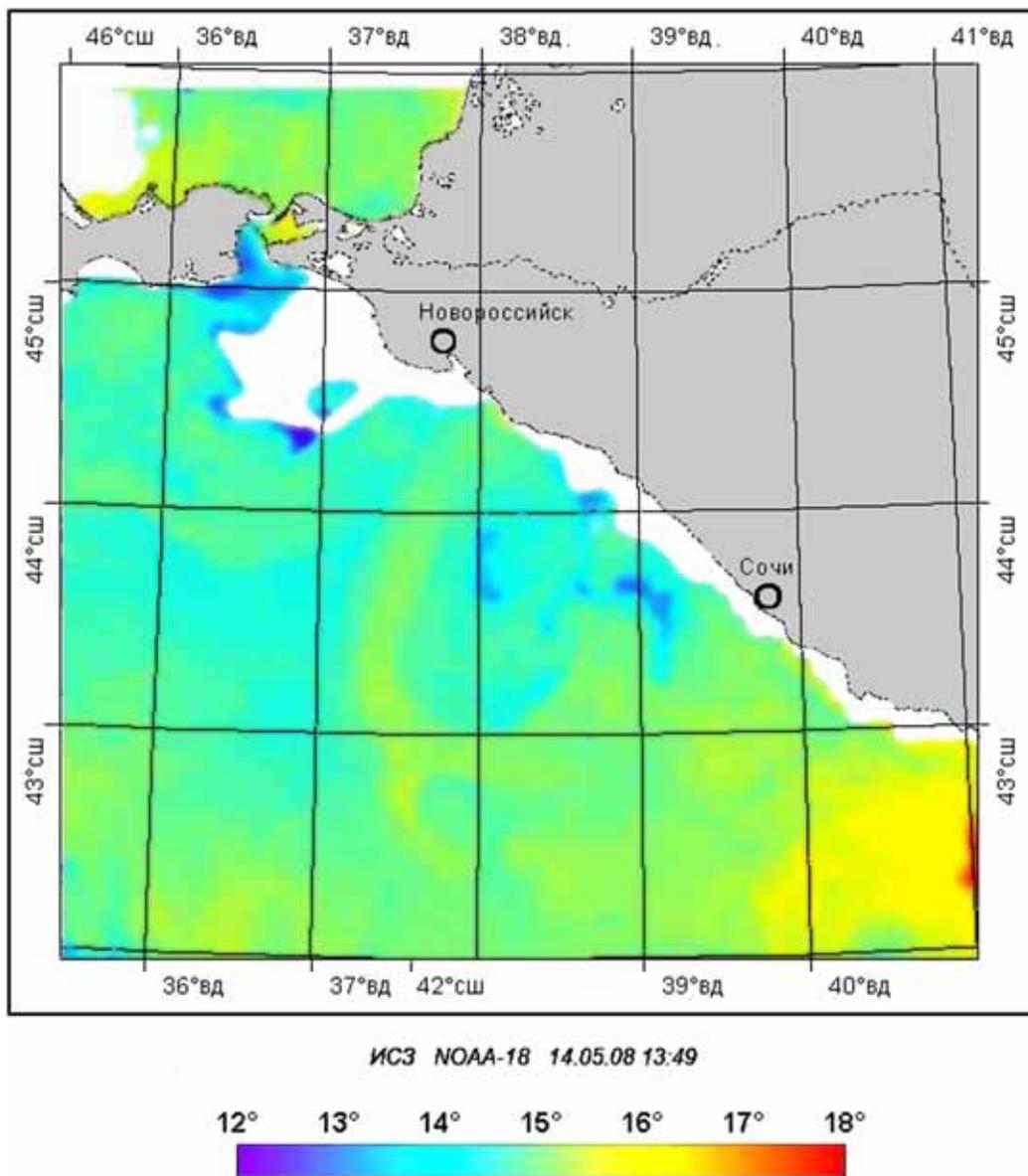
Рис. 4.2a. Карта циркуляции и состояния водной среды, совмещенная с цветосинтезированным изображением северо-восточной части Черного моря (© ГУ «НИЦ «Планета»)



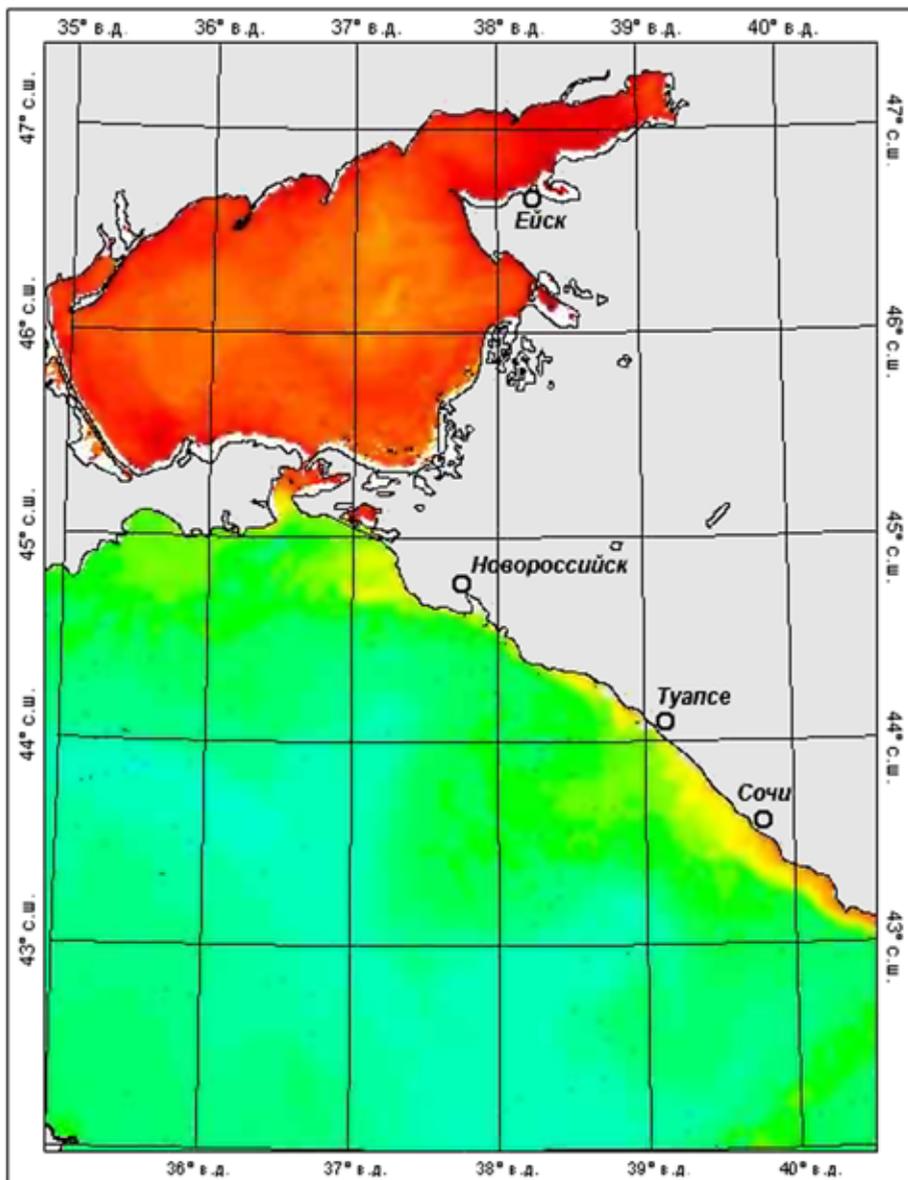
ИСЗ NOAA-18, AVHRR, разрешение 1000 м 18.05.08 03:13 МСК
спектральный канал: 10,3-11,3 мкм (4)

-  - примерное положение Основного черноморского течения
-  - прибрежные антициклонические вихри
-  - циклонические вихри
-  - вихревой диполь

Р и с . 4.2б. Карта циркуляции и состояния морской поверхности, совмещенная с ИК-изображением северо-восточной части Черного моря (© ГУ «НИЦ «Планета»)

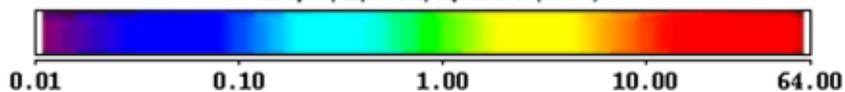


Р и с . 4.2в. Карта температуры поверхности северо-восточной части Черного моря по данным ИК-радиометра AVHRR NOAA (© ГУ «НИЦ «Планета»)

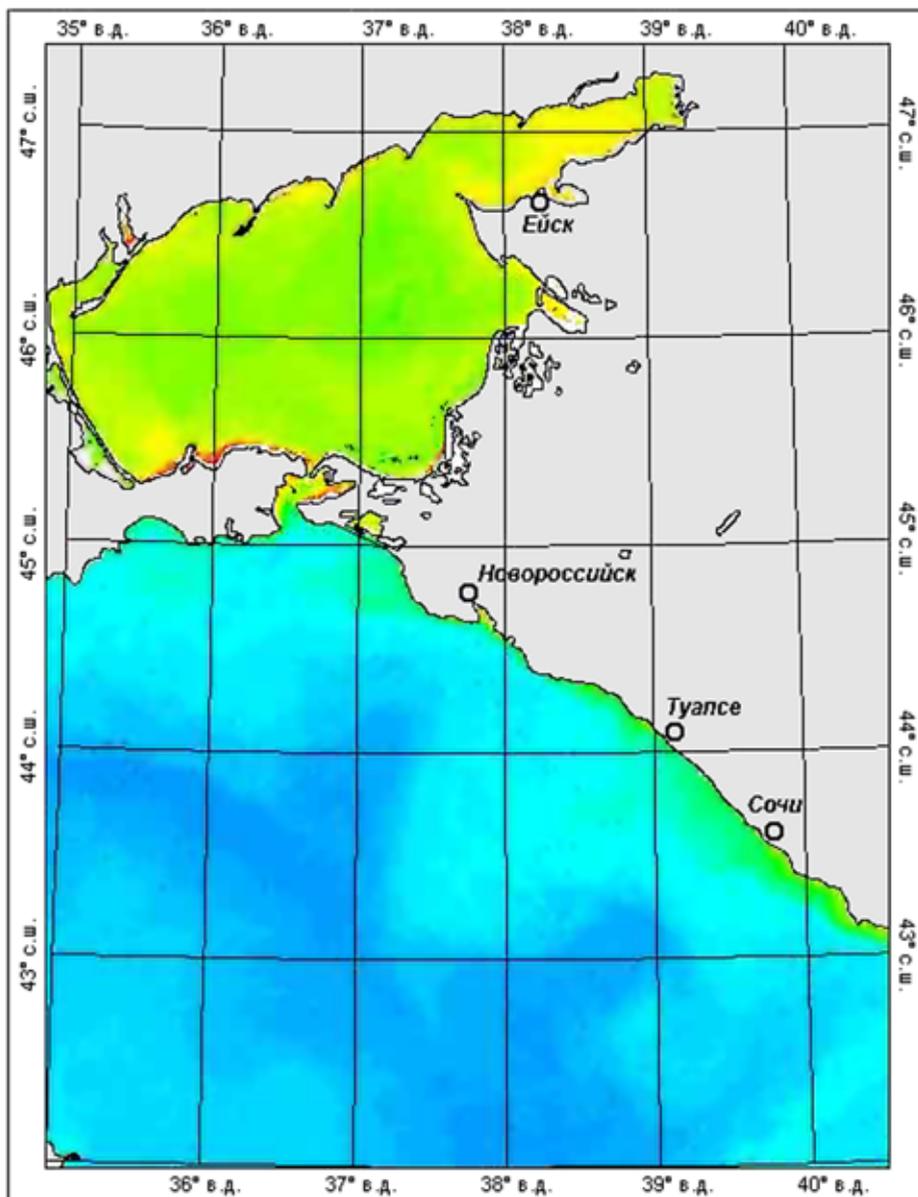


ИСЗ AQUA, MODIS, разрешение 1000 м, 2 декада мая 2008 г.

концентрация хлорофилла-а (мг/м^3)



Р и с. 4.2г. Карта среднедекадных значений концентрации хлорофилла-а в Азовском море и северо-восточной части Черного моря (© ГУ «НИЦ «Планета»)



ИСЗ AQUA, MODIS, разрешение 1000 м, 2 декада мая 2008 г.

коэффициент диффузного ослабления $K_d(490)$, m^{-1}

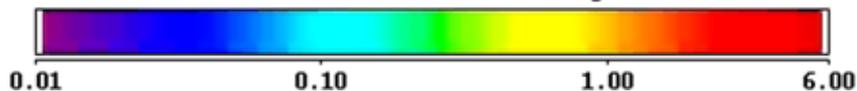


Рис. 4.2д. Карта среднедекадных значений коэффициента диффузного ослабления $K_d(490)$ в Азовском море и северо-восточной части Черного моря (© ГУ «НИЦ «Планета»)

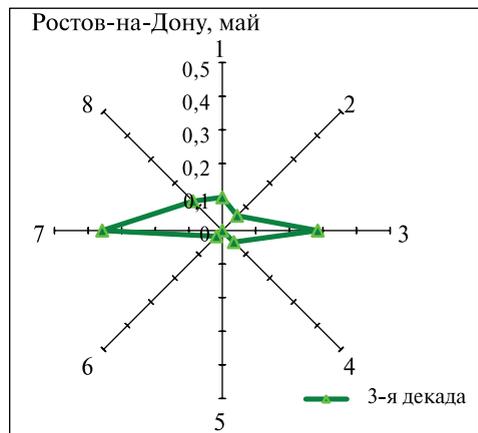
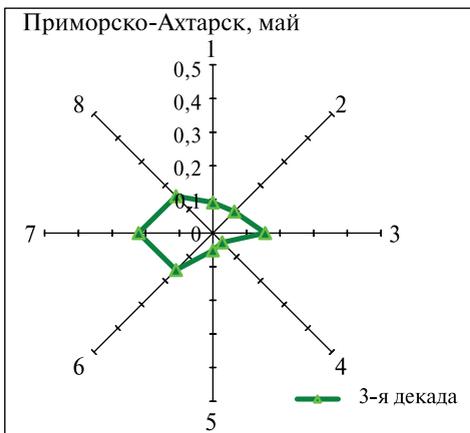
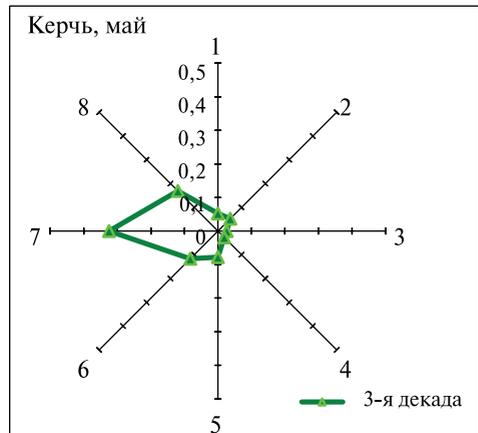
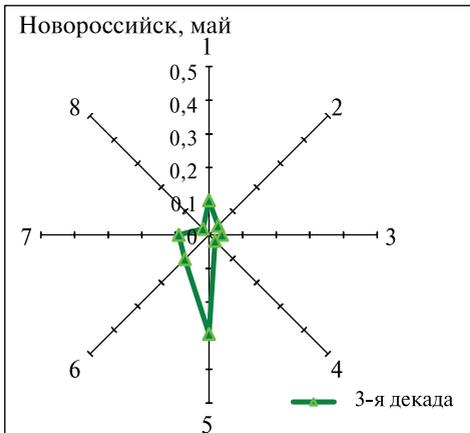
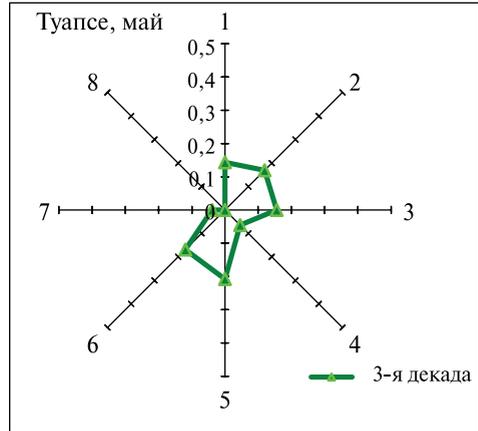
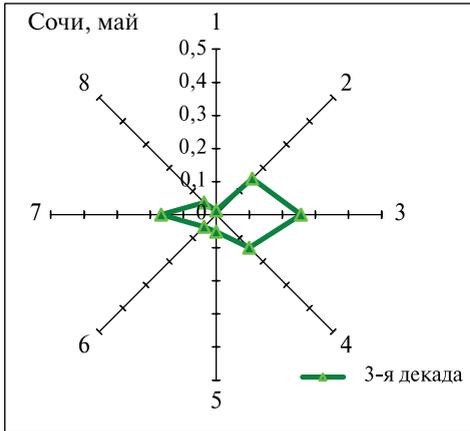


Рис. 4.2e. Розы ветров по данным измерений на станциях Сочи, Туапсе, Новороссийск, Приморско-Ахтарск, Керчь и Ростов-на-Дону за III декаду мая 2008 г. (© ГУ «НИЦ «Планета»)

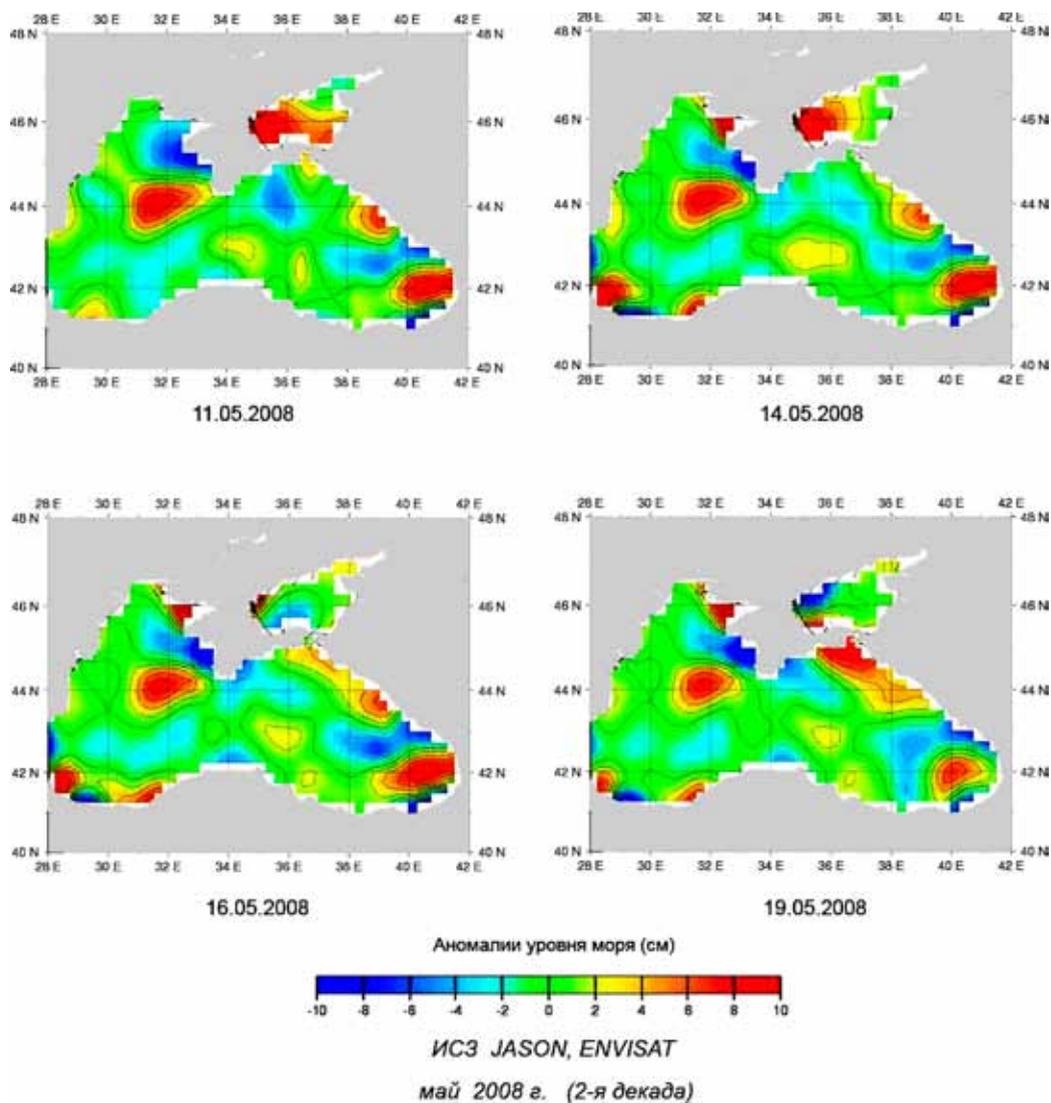


Рис. 4.2ж. Изменение уровня поверхности Черного и Азовского морей по результатам спутниковых альтиметрических измерений (© ГУ «НИЦ «Планета»)

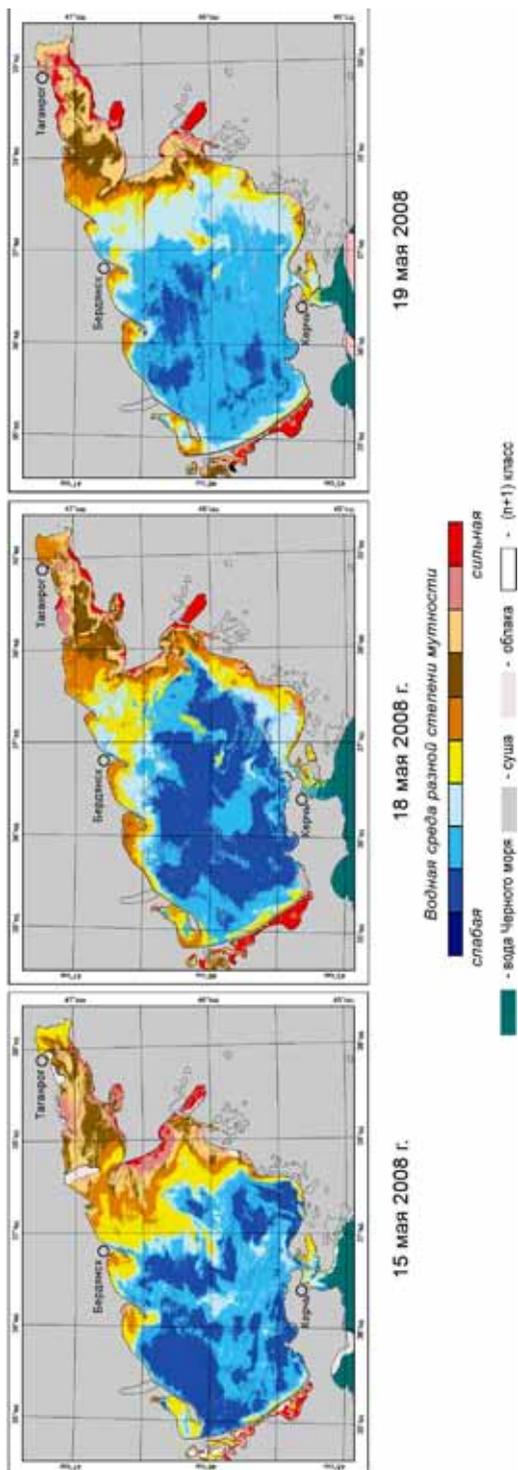
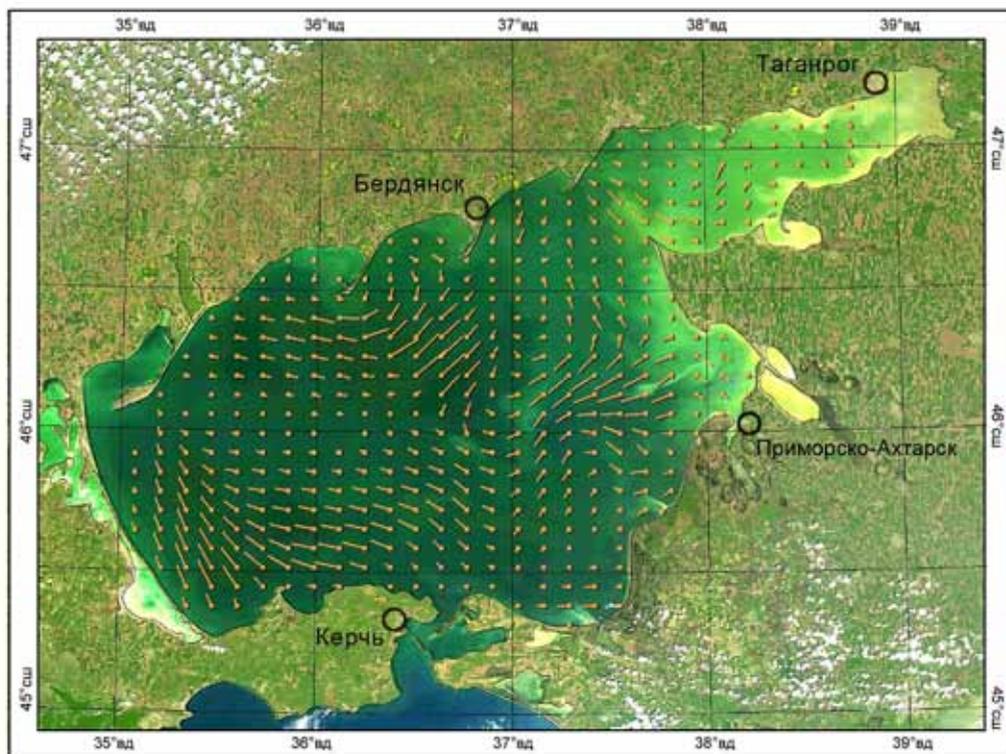


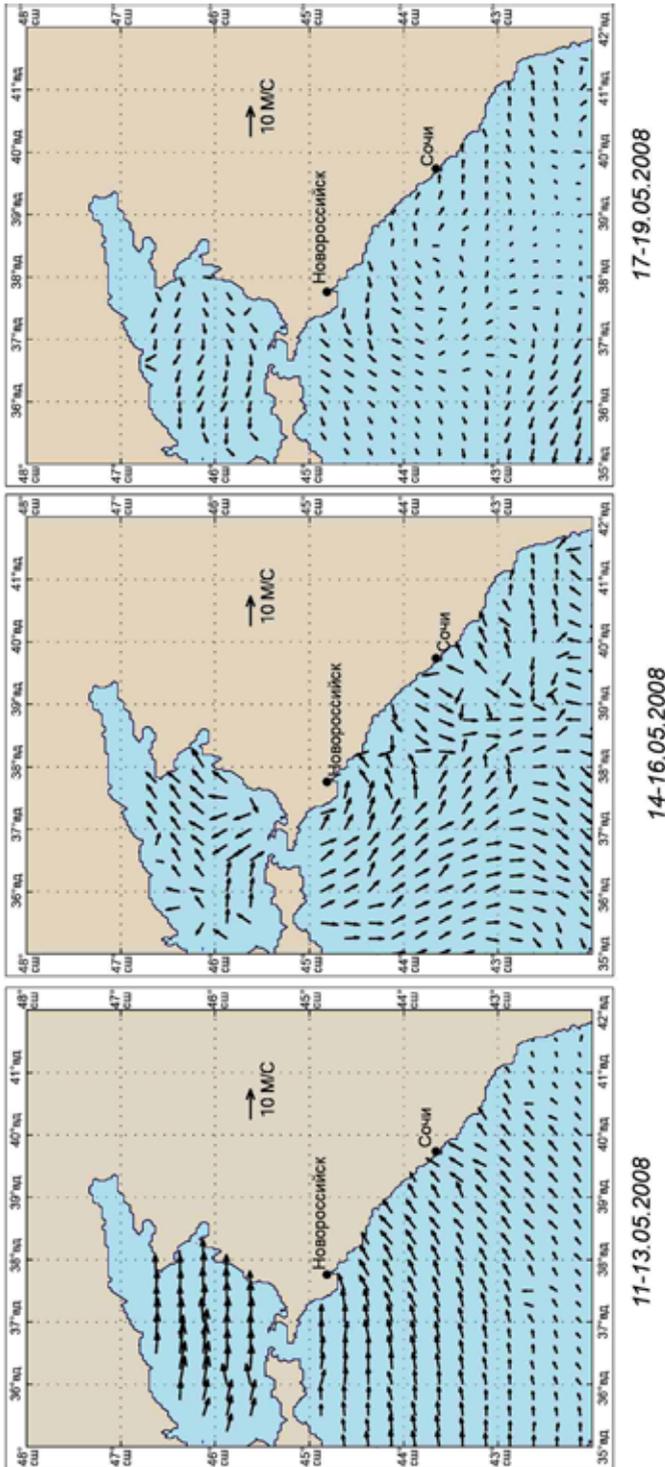
Рис. 4.23. Тематические карты состояния водной среды Азовского моря, полученные с помощью метода распознавания без обучения по данным MODIS Тетра, разрешение 250 м (спектральные каналы 0,620–0,670; 0,545–0,565; 0,459–0,479 мкм) (© ГУ «НИЦ «Планета»)



ИСЗ AQUA, MODIS, разрешение 250 м 19.05.07 10:55

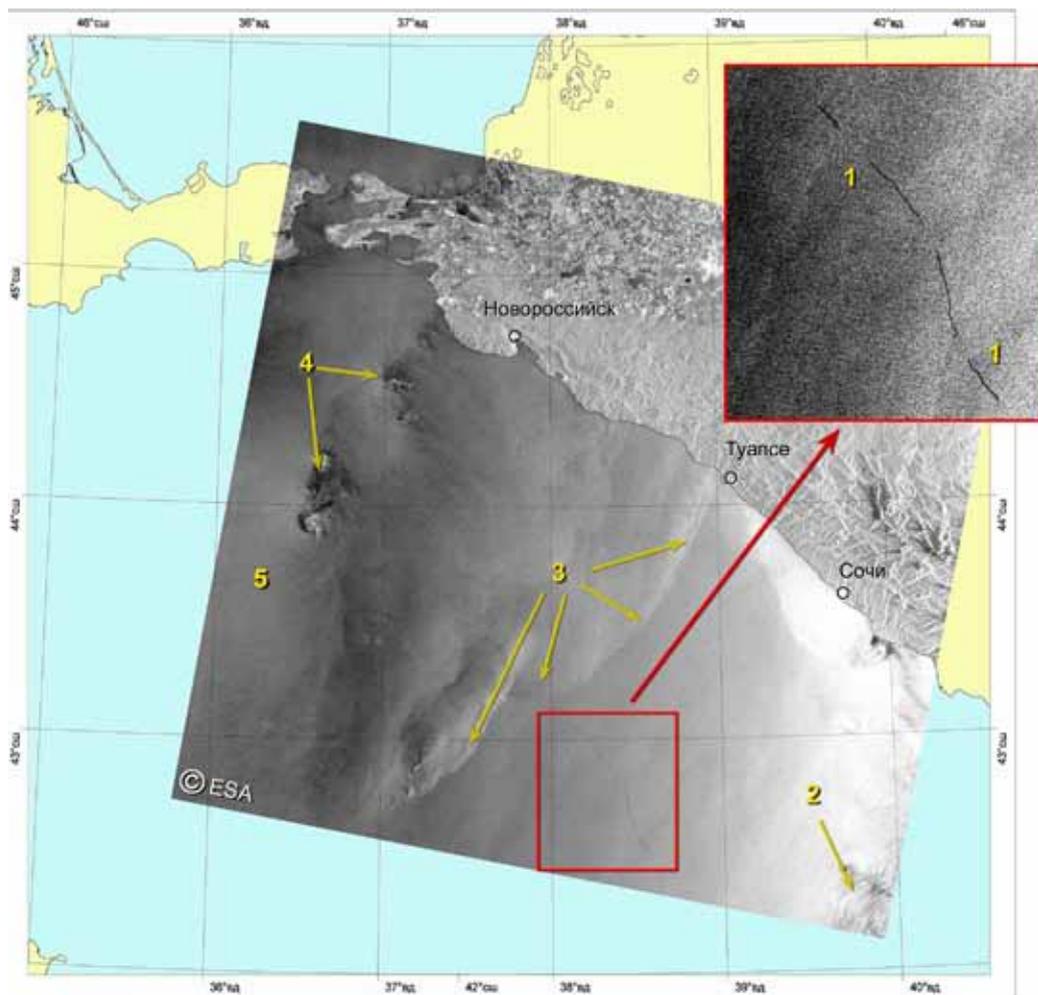
спектральные каналы R: 0,620-0,670 мкм (1); G: 0,545-0,565 мкм (4); B: 0,459-0,479 мкм (3)

Рис. 4.2и. Карта крупномасштабного переноса в приповерхностном слое моря за 1 сутки с 18.05.2008 (08:30) по 19.05.2008 (10:55), совмещенная с изображением Азовского моря (© ГУ «НИЦ «Планета»)



Данные сканнера SeaWind ИСЗ QuikSCAT, разрешение 25 км, 2-я декада мая 2008 г.

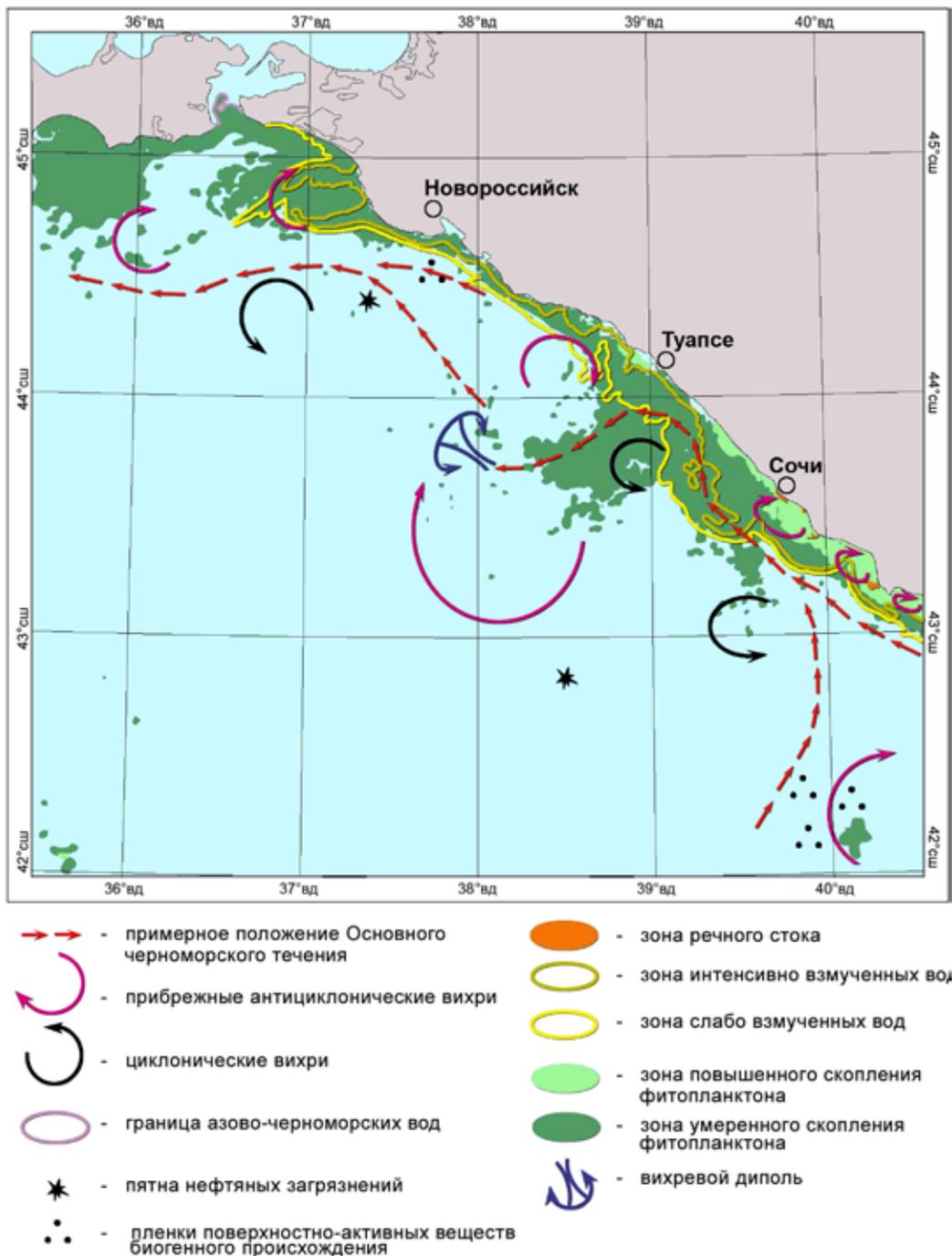
Р и с . 4.2к. Распределение средних (за 3 суток) значений скорости приволного ветра в северо-восточной части Азово-Черноморского бассейна (получено на основе стандартных алгоритмов NASA) © ГУ «НИЦ «Планета»



ИСЗ ENVISAT, ASAR 13.05.2008 г. 07:40 GMT, разрешение 75 м

- 1 - пленки нефтяного загрязнения с судна
- 2 - пленки биогенных загрязнений вдоль линий тока поверхностных течений
- 3 - проявление воздействия атмосферного фронта на взволнованную морскую поверхность
- 4 - области интенсивных осадков
- 5 - проявление воздействия атмосферных внутренних волн на взволнованную морскую поверхность

Р и с. 4.2л. Радиолокационное изображение участка Черного моря и результат его дешифрирования (© ИКИ РАН, ГУ «НИЦ «Планета»)



Р и с . 4.2м. Обобщенная карта-схема состояния и загрязнения водной среды в российском секторе Черного моря во 2-й декаде мая 2008 г. (© ГУ «НИЦ «Планета»)

- 3) карты температуры поверхности Черного и Азовского морей по данным ИК-радиометра AVHRR NOAA и аппаратуры MODIS Aqua;
- 4) карты средних за декаду и текущих значений концентрации хлорофилла-*a* по данным спектрорадиометра MODIS Terra/Aqua;
- 5) карты средних за декаду и текущих значений коэффициента диффузного ослабления K_d на длине волны 490 нм ($K_d(490)$) по данным спектрорадиометра MODIS Terra/Aqua;
- 6) декадные розы ветров по данным измерений на станциях Сочи, Туапсе, Новороссийска, Приморско-Ахтарска, Керчи и Ростова-на-Дону;
- 7) карты изменения уровня моря по альтиметрическим данным ИСЗ Jason и Envisat;
- 8) карты результатов автоматизированного распознавания водных масс;
- 9) карты переноса водных масс (для безоблачных изображений);
- 10) карта распределения средних (за 3 суток) значений скорости приводного ветра по данным ИСЗ QuikSCAT;
- 11) радиолокационные изображения участков прибрежной акватории, полученные аппаратурой ASAR Envisat и SAR ERS-2, и результат их дешифрирования;
- 12) обобщенные карты-схемы состояния и загрязнения водной среды на основе комплексного использования спутниковых и наземных данных.

Примеры оперативной спутниковой продукции приведены на рис. 4.2а–м (см. с. 212–223). Более подробно с данной продукцией можно ознакомиться на тематическом сайте НИЦ «Планета» (<http://planet.iitp.ru/index1.html>).

Реглярно составлялись декадные, месячные и итоговые отчеты с результатами анализа спутниковых данных и оценки гидродинамической обстановки и загрязнения водной среды, которые передавались потребителям. Выпускались также ежемесячные и итоговые бюллетени с результатами спутникового мониторинга российского сектора Черного и Азовского морей. Итоговый бюллетень за 2006 г. имел приложение в виде «Альбома космических изображений высокого разрешения и результатов их дешифрирования», подготовленный на основе данных, полученных, обработанных и проанализированных в ИКИ РАН. Бюллетени передавались для последующего распространения через Северо-Кавказский УГМС.

4.4. АНТРОПОГЕННЫЕ И БИОГЕННЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ

В ходе проведения космического мониторинга за период 2006–2008 гг. на основе комплексного анализа всей совокупности спутниковой информации были выявлены основные виды антропогенных и биогенных загрязнений прибрежных акваторий и определены закономерности и типовые ситуации их распространения в российском секторе Черного и Азовского морей (*Бедрицкий* и др., 2007, 2009).

4.4.1. Основные типы циркуляции, сопровождающиеся различным характером распределения загрязнений в прибрежной зоне в российском секторе Черного моря

Первый тип циркуляции устанавливается в конце сентября или октябре и обычно продолжается до апреля включительно. В центральной и северной части акватории преобладают умеренные и сильные северо-восточные ветры, ОЧТ относительно устойчиво и распространяется, в основном, вдоль границы шельфа. В южной части российского сектора вихреобразование пониженное. Значителен приток вод из грузино-абхазского сектора Черного моря. В северной части акватории могут возникать мезомасштабные антициклонические вихри и кросс-шельфовые течения. Поступающие в море загрязнения локализуются в прибрежной зоне, наблюдается перенос загрязнений вдоль берега. В районах кросс-шельфовых течений происходит вынос загрязнений в открытое море.

Переходный (второй) тип циркуляции чаще всего наблюдается в мае и августе. Формируется в условиях неустойчивых и переменных ветров и ослабленного притока прибрежных вод из грузино-абхазского сектора. Основное черноморское течение становится менее устойчивым, в южной части российского сектора область переменных течений расширяется в глубоководную зону. Вблизи побережья в южной и центральной частях сектора образуются меандры и прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), которые, как правило, перемещаются вдоль берега с основным потоком ОЧТ, а в центральной и северной частях российского сектора могут отрываться от побережья и следовать на запад или северо-запад. При прохождении ПАВ возникают прибрежные противотечения. Загрязняющие вещества в прибрежной акватории распределены неравномерно. Часть их переносится поперек шельфа в результате действия ПАВ, другая часть — вдоль берега, либо аккумулируется внутри ПАВ и смещается вместе с ними. В северной части акватории поле течений неоднородно и зависит от характера действующих ветров. Основное черноморское течение лишь частично проникает на таманский шельф, основной поток отрывается от побережья и уходит на запад в глубоководную зону, часто образуя крупные меандры южнее границы таманского шельфа.

Летний (третий) тип циркуляции устанавливается в условиях длительного ослабления ветра, а также снижения поступления вод из грузино-абхазского сектора. Основное черноморское течение ослаблено, активно меандрирует, распадается на несколько ветвей, прибрежная ветвь и вдольбереговой перенос местами могут отсутствовать. Скорость прибрежного течения низкая. В центральной части сектора наблюдаются крупные малоподвижные антициклонические вихри, которые, постепенно смещаясь вдоль побережья, осуществляют водообмен поперек шельфовой зоны и создают реверсивные прибрежные течения. Область распространения относительно загрязненных вод значительно расширяется в сторону открытого моря. В северной части в случаях усиления ветра могут наблюдаться разнообразные поля течений, тяготеющие к переходному типу циркуляции. Направление переноса на таманском шельфе зависит от направлений преобладающих ветров.

Кроме того, в период наблюдений возникали смешанные типы циркуляции. При этом характер циркуляции в северной части российского сектора зависел, главным

образом, от структуры поля ветра и интенсивности северо-восточных ветров, в южной части — как от характера ветрового воздействия, так и от структуры течений в грузино-абхазском секторе Черного моря. В центральной части российского сектора, как правило, наблюдалась переходная картина циркуляции.

Сведения о преобладании различных типов циркуляции вод за период наблюдения 2008 г. представлены в табл. 4.1. Анализ гидродинамической обстановки в прибрежной акватории российского сектора Черного моря показал, что, например, в апреле и мае 2008 г. преобладал 3-й тип циркуляции вод, с июня по август — смешанные типы с преобладанием 1-го типа, в сентябре — 1-й тип, в октябре преобладал 2-й тип. В 2006 г. наблюдалась иная картина: 3-й тип циркуляции преобладал в сентябре, а 1-й, свойственный осенне-зимнему периоду, существовал в июле. Это было вызвано преобладаем ветров северо-восточного направления.

Таблица 4.1. Типы циркуляции вод в шельфовой зоне российского сектора Черного моря в апреле-октябре 2008 г. (© ИКИ РАН, ГУ «НИЦ «Планета»)

Месяц/декада	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
I декада	3-й тип	2-3-й тип	3/1-й тип*	3/2-й тип*	1-й тип	1-й тип	1-2-й тип
II декада	3-й тип	3-й тип	1-й тип	1/2-й тип*	1/2-й тип*	1-й тип	2/3-й тип*
III декада	3-й тип	2-3-й тип	1/2-й тип*	1-й тип	1/2-й тип*	1-й тип	2/1-й тип*

* Первая цифра обозначает характер циркуляции в северной части акватории, вторая — в южной.

4.4.2. СУДОВЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей, представляют собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов и содержащих их жидкостей.

Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров, случаются, к счастью, довольно редко. Гораздо чаще загрязнение поверхности моря происходит при рутинных операциях на судах. Основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов. Подобные незаконные сбросы настолько распространены, что в совокупности наносят гораздо больший ущерб экосистеме Черного моря, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

Суда могут сбрасывать нефтепродукты на протяжении нескольких десятков километров пути. На рис. 4.3 (см. с. 227) цифрой 1 отмечен пример «идеального» свежего сброса. Радиолокационная съемка проводилась в условиях умеренного ветра и небольшого волнения. Сужение полосы к северо-востоку свидетельствует, что судно, сбрасывающее нефтепродукты, движется в этом направлении. Яркая точка на северо-восточном конце полосы показывает текущее положение судна. Полоса загрязнений тянется на 32 км.

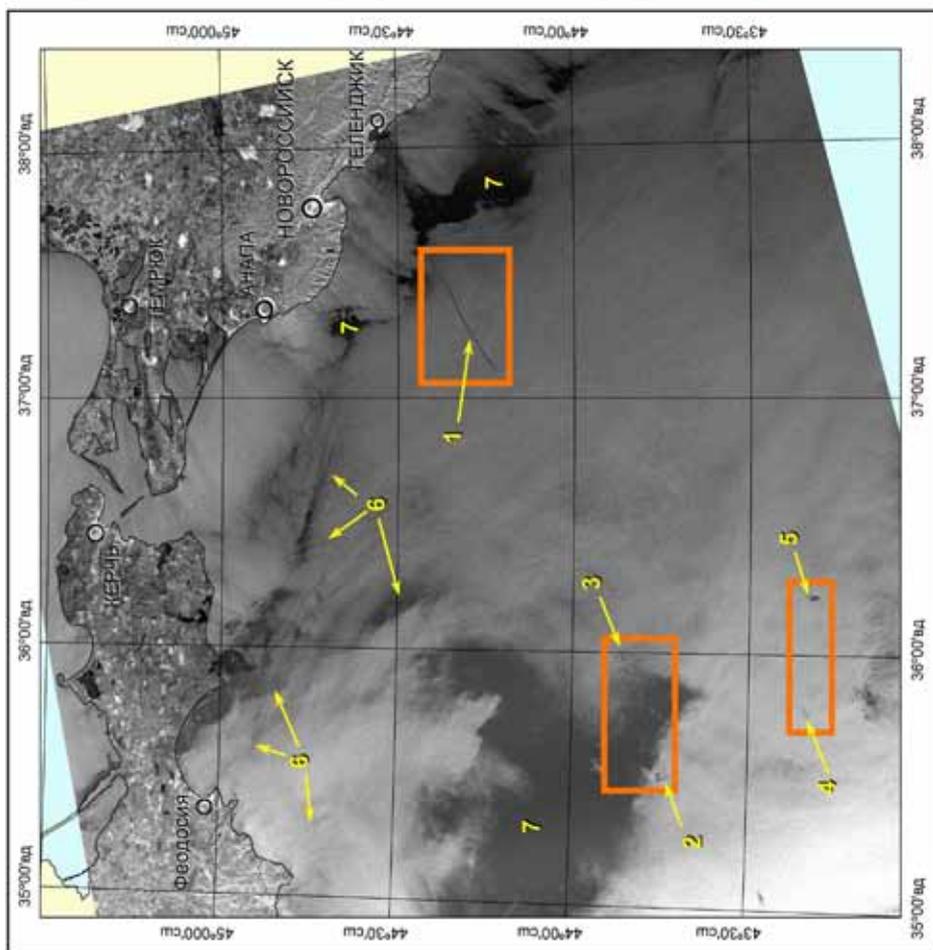


Рис. 4.3. Фрагмент изображения ASAR Epriset, полученного 19.09.2006 г. в 19:19 UTC с разрешением в точке 75 м: 1, 2, 3, 4, 5 — пленки нефтяных загрязнений с судов; 6 — пленки биогенных загрязнений вдоль линий тока поверхностных течений; 7 — области ветрового затишья (© ИКИ РАН, ГУ «НИЦ «Планета»)

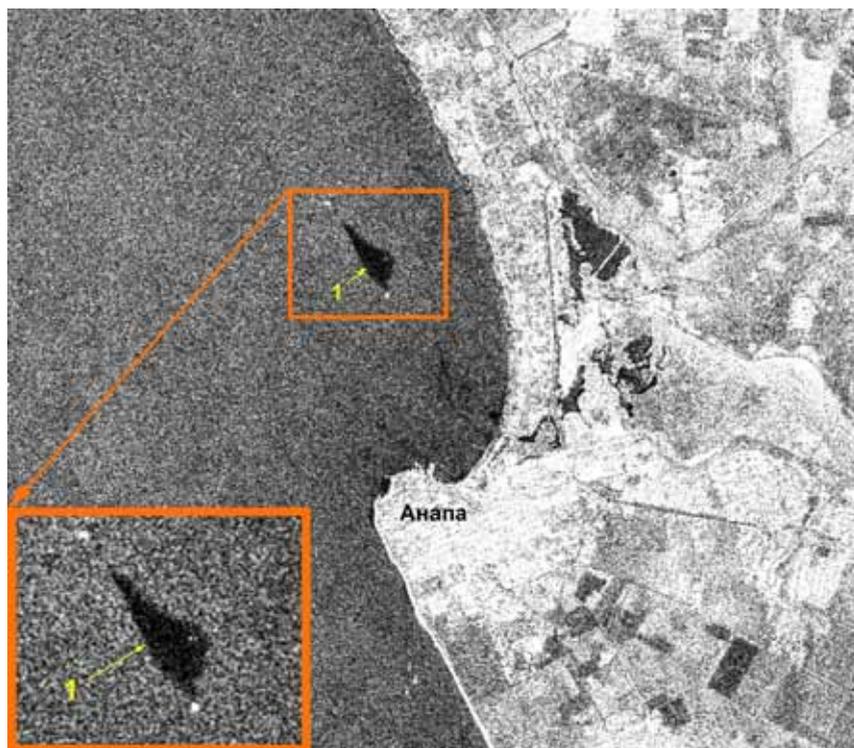
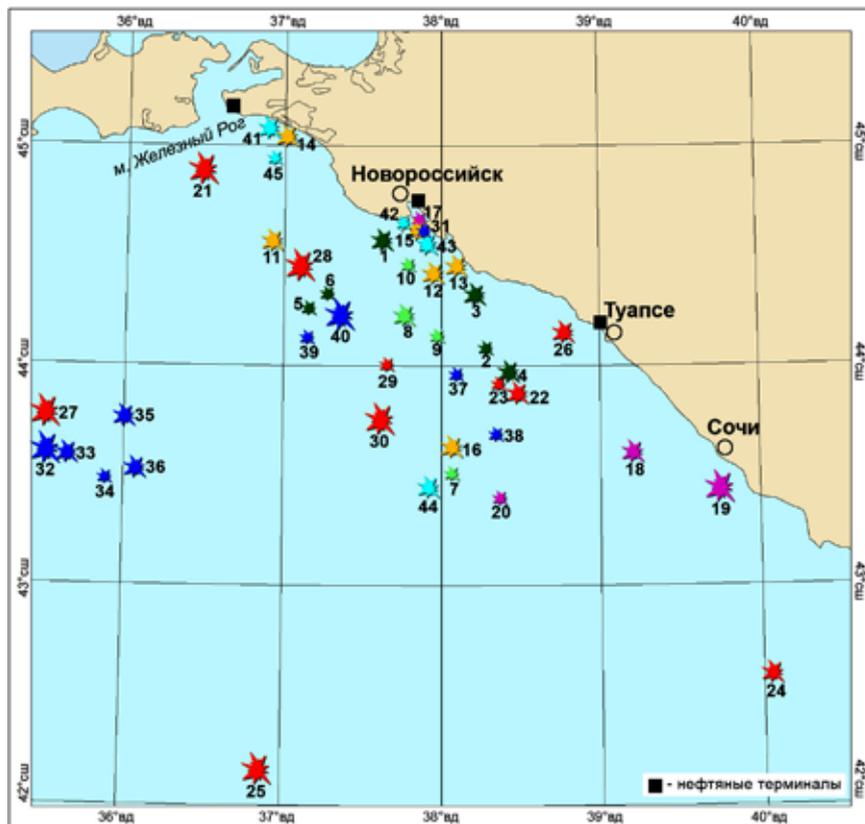


Рис. 4.4. Фрагмент ASAR Envisat изображения (18×16 км), полученного 17.04.2007 г. в 19:19 UTC с разрешением в точке 12,5 м: 1 — сброс загрязненных нефтепродуктами вод с судна в 2 км от детских здравниц в Анапе. Общая площадь загрязнений $0,4 \text{ км}^2$ (© ESA 2007, ИКИ РАН)

При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. На рис. 4.4 представлено радиолокационное изображение, на котором выявлен сброс с неподвижного судна загрязненных вод всего в двух километрах от детских здравниц в Анапе. Общая площадь загрязнений — $0,4 \text{ км}^2$. Судно, с которого был осуществлен сброс, находится у нижнего правого края пятна.

За три года спутниковых наблюдений в российском секторе Азово-Черноморского бассейна было выявлено 184 случая загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов. Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от $0,1$ до 30 км^2 . Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила примерно 726 км^2 . Обобщенные карты-схемы нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленные на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006–2008 гг., представлены на рис. 4.5 (см. с. 229–231). Даже без учета катастрофического разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. наибольшее число нефтяных загрязнений было выявлено в 2007 г. Причем общее число обработанных и проанализированных радиолокационных изображений в 2006 г. составило 117 кадров, а в 2007 г. за тот же период (апрель–октябрь) — только 112.

4.4. Антропогенные и биогенные загрязнения прибрежных акваторий российского сектора...



Даты нефтяных разливов - с указанием их площади (в кв.км):

апрель		июль		сентябрь	
★ 1	07.04.06 - 2,0	★ 17	02.07.06 - 0,2	★ 31	04.09.06 - 0,8
★ 2	07.04.06 - 1,0	★ 18	11.07.06 - 4,0	★ 32	16.09.06 - 6,5
★ 3	13.04.06 - 2,0	★ 19	11.07.06 - 9,0	★ 33	19.09.06 - 1,6
★ 4	17.04.06 - 2,3	★ 20	14.07.06 - 0,1	★ 34	19.09.06 - 0,5
★ 5	23.04.06 - 0,1			★ 35	19.09.06 - 1,2
★ 6	23.04.06 - 0,2			★ 36	19.09.06 - 3,5
май		август		★ 37	19.09.06 - 0,7
★ 7	09.05.06 - 0,6	★ 21	02.08.06 - 9,0	★ 38	19.09.06 - 0,8
★ 8	12.05.06 - 1,3	★ 22	03.08.06 - 2,0	★ 39	19.09.06 - 0,2
★ 9	25.05.06 - 0,7	★ 23	03.08.06 - 0,5	★ 40	19.09.06 - 9,2
★ 10	31.05.06 - 0,8	★ 24	03.08.06 - 2,8		
июнь		★ 25	06.08.06 - 13,0	октябрь	
★ 11	03.06.06 - 3,3	★ 26	09.08.06 - 4,4	★ 41	02.10.06 - 2,7
★ 12	07.06.06 - 1,5	★ 27	12.08.06 - 5,2	★ 42	09.10.06 - 0,1
★ 13	16.06.06 - 1,2	★ 28	22.08.06 - 12,0	★ 43	09.10.06 - 2,7
★ 14	19.06.06 - 2,8	★ 29	22.08.06 - 1,0	★ 44	09.10.06 - 2,9
★ 15	19.06.06 - 1,4	★ 30	28.08.06 - 6,4	★ 45	30.10.06 - 1,0
★ 16	29.06.06 - 1,4				

Рис. 4.5а. Обобщенные карты-схемы нефтяных загрязнений в российском секторе Черного моря, составленные на основе данных ASAR Envisat и SAR ERS-2 за апрель-октябрь 2006 г.

(© ИКИ РАН, ГУ «НИЦ «Планета»)

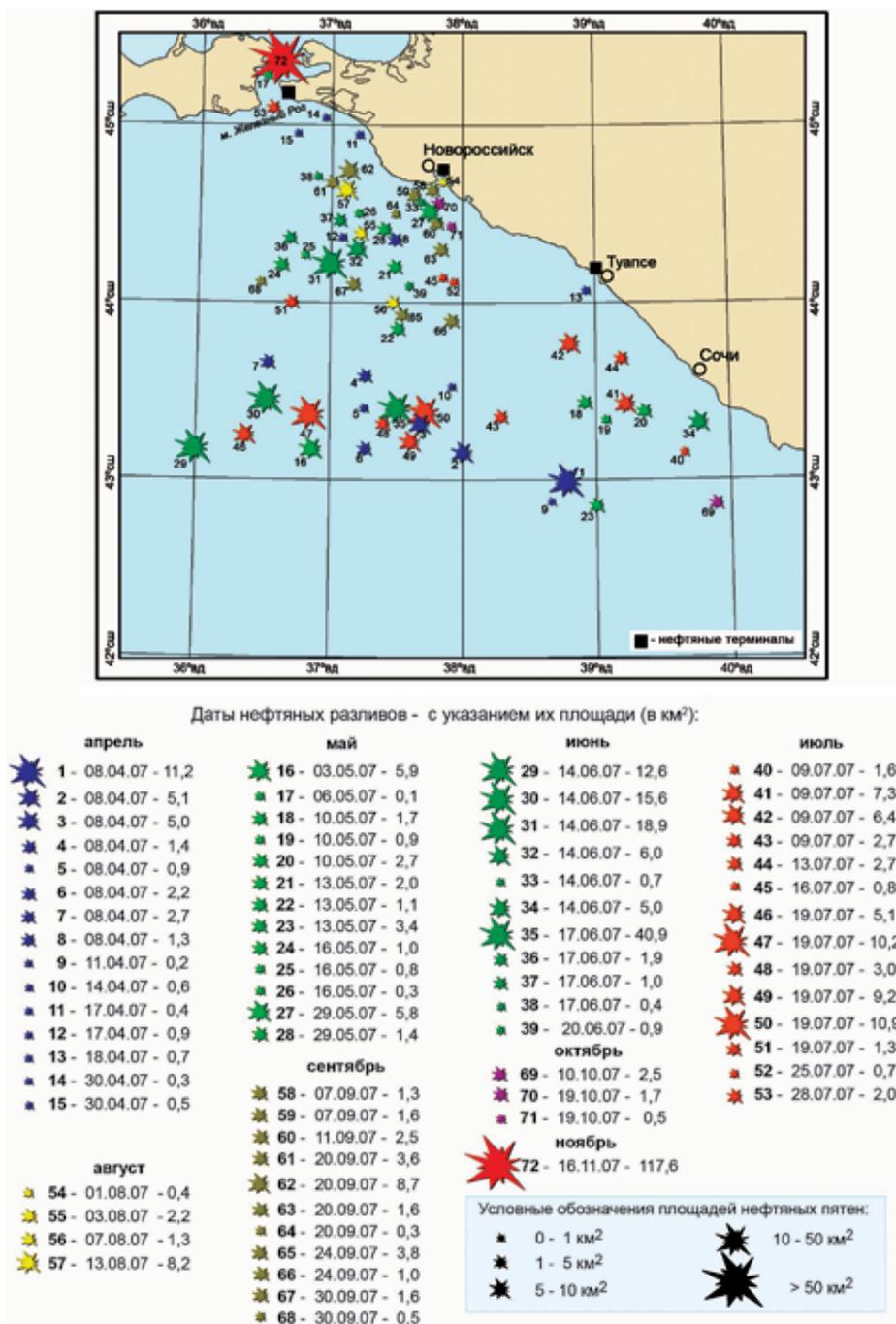


Рис. 4.5б. Обобщенные карты-схемы нефтяных загрязнений в российском секторе Черного моря, составленные на основе данных ASAR Envisat и SAR ERS-2 за апрель-ноябрь 2007 г.

(© ИКИ РАН, ГУ «НИЦ «Планета»)

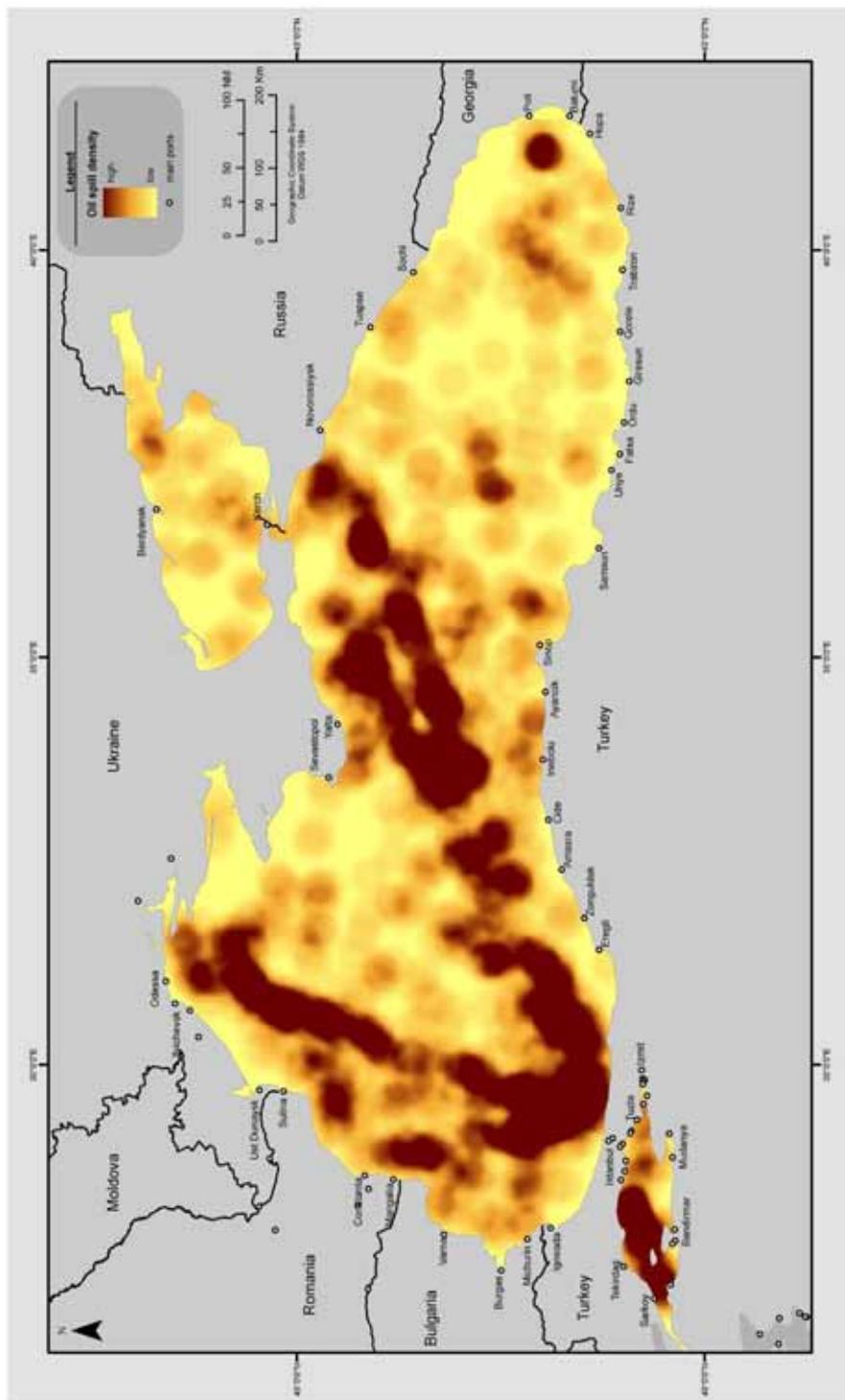


Рис. 4.6. «Горячие точки» нефтяных загрязнений, выявленных в Черном море в 2000–2004 гг. (<http://www.osce.org/eea/32917>)

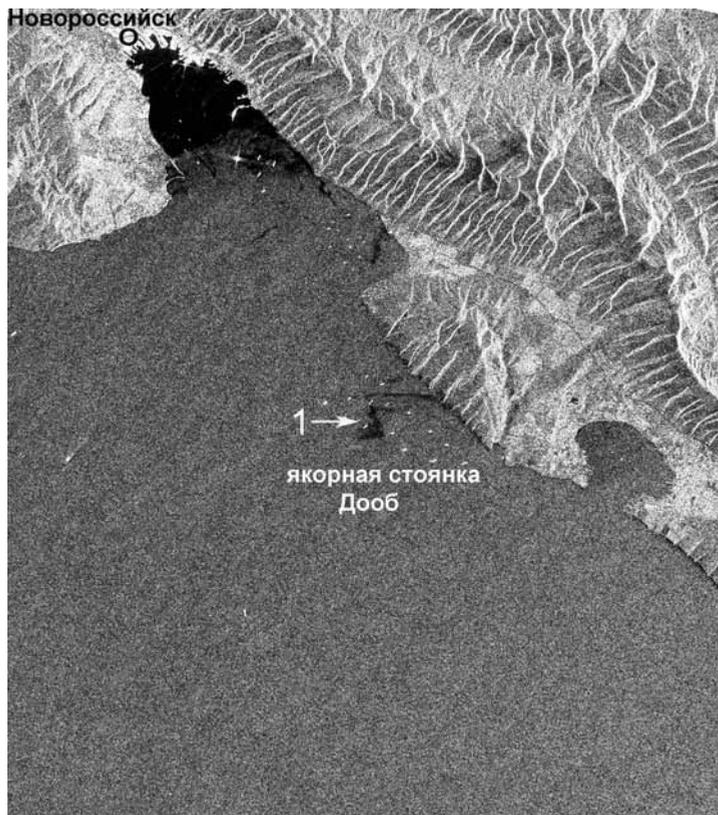


Рис. 4.7. Фрагмент ASAR Envisat-изображения (31×35 км), полученного 28.01.2007 г. в 07:43 UTC с разрешением в точке 12,5 м: 1 — сброс загрязненных вод с судна, находящегося на якорной стоянке «Дооб». Общая площадь загрязнений 1,1 км² (© ESA 2007, ИКИ РАН)

Систематизация спутниковых данных по загрязнению моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволила выявить районы наиболее частого сброса вдоль судоходных трасс Стамбул-Новороссийск и Стамбул-Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыса Железный Рог (см. рис. 4.5), что полностью согласуется с данными, полученными учеными из Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии в 2000–2004 гг. (рис. 4.6, см. с. 232). Другой район с повышенной антропогенной нагрузкой находится в Керченском проливе, где на якорной стоянке происходит перегрузка нефти и нефтепродуктов с малых нефтеналивных судов на крупнотоннажные танкеры.

Анализ спутниковых данных показал, что в летне-осенний период в районе Новороссийск – Геленджик регулярно происходит загрязнение морской поверхности нефтепродуктами, что в свою очередь приводит к загрязнению береговой зоны и пляжей одного из крупнейших курортов России на Черном море. Данные, накопленные с 1999 г., свидетельствуют о том, что источниками загрязнений являются сбросовые воды с судов, которые следуют в порт и к нефтяным терминалам Новороссийска или ожидают погрузки на якорной стоянке в районе мыса Дооб (рис. 4.7).



Рис. 4.8. Усиленный речной сток горных рек после прошедших 16.10.2008 г. грозовых дождей. Фрагмент MODIS Aqua изображения (композиция 3-го, 2-го и 1-го каналов) от 18.10.2008 г. Пространственное разрешение 250 м

Это еще раз подтверждает выводы (*Ferraro et al.*, 2009) о том, что по количеству случаев и объему сброшенных с судов нефтепродуктов судоходные трассы европейских морей существенно превосходят остальные акватории.

4.4.3. Загрязнения береговыми стоками

Во время проведения регулярного спутникового мониторинга было установлено, что, в период выпадения ливневых осадков в предгорьях Кавказа антропогенные загрязнения (бытовые и промышленные отходы, нефтепродукты, удобрения и др.), поступающие со всего водосбора в море с речным стоком, многократно возрастают. Антропогенные загрязнения усиливаются потоками грязи с подтапливаемых площадей. Особенно это касается горных рек с незарегулированным стоком (Мзымта, Шахе и др.). В этот период в прибрежных акваториях, примыкающих к устьям рек, по спутниковым данным, наблюдается существенное увеличение зон распространения внутриводной взвеси, появление локальных вспышек цветения фитопланктона, увеличение количества плавающего мусора, пены, поверхностно-активных веществ (включая пленки нефтепродуктов). Усиление речного стока горных рек носит кратковременный характер (2–3 суток), но именно в этот период происходят самые масштабные загрязнения прибрежной зоны моря (рис. 4.8, см. с. 234).

4.4.4. Особенности загрязнения Азовского моря

В Азовском море по данным многолетних спутниковых наблюдений определены районы повышенного содержания загрязняющих веществ, к которым относятся северо-восточная часть Таганрогского залива, Ейский и Бейсугский лиманы. Было также установлено, что более чистые воды находятся в южной и юго-восточной частях Азовского моря, что объясняется поступлением в этот район, в результате водообмена через Керченский пролив, относительно чистых черноморских вод.

Водообмен между Азовским и Черным морями в период наблюдений не был стабильным, имели место периоды его временного усиления и ослабления. Периодически азовоморские воды проникали через пролив в Черное море. Дальнейшее распространение более загрязненных и богатых хлорофиллом азовоморских вод зависело от знака циркуляции в Керченском предпроливье. Основным направлением переноса вод было западное — вдоль крымского побережья в сторону Феодосии, однако в случае формирования на таманском шельфе антициклонических вихрей распространение азовоморских вод происходило на восток вдоль российского побережья.

4.4.5. Биогенные загрязнения

Биогенные пленки — результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом фито- и зоопланктона, а также бактерий. Они образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова.

Органические пленки сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 6–7 м/с. После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики.

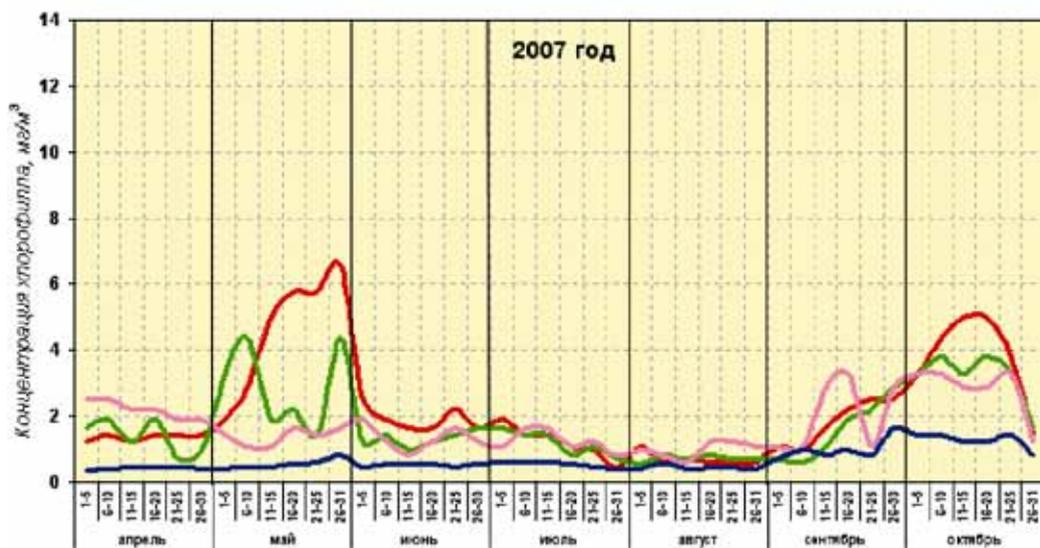
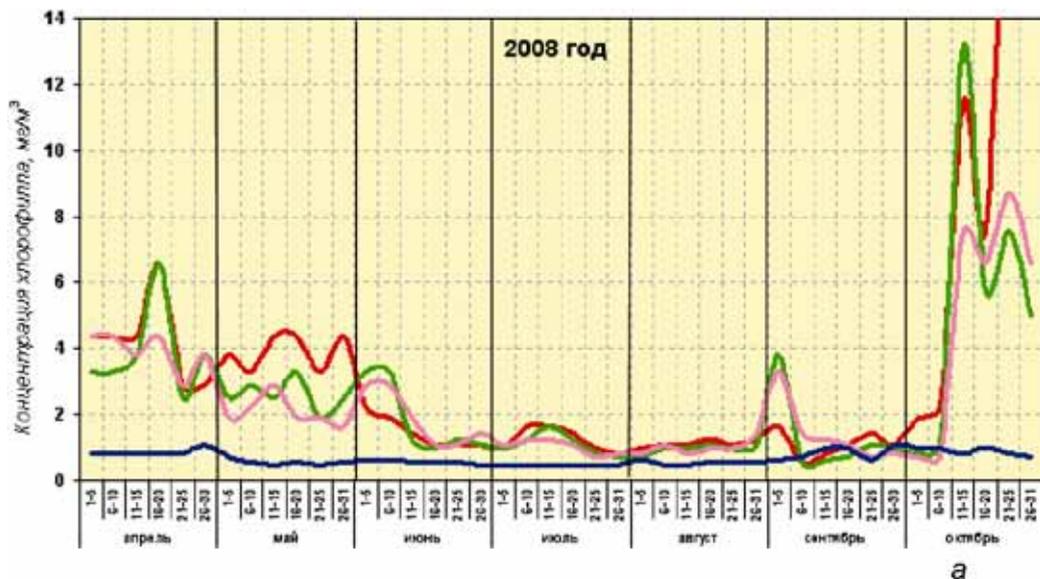
Крупные скопления фитопланктона наблюдаются в периоды его «цветения»; в конце весны — начале лета — первый пик и осенью — второй пик. В эти периоды из-за недостатка растворенного в воде кислорода происходит массовая гибель фитопланктона, при этом на поверхности моря образуются органические пленки, подобные нефтяным. В отличие от нефтяных пленок, растекающихся по поверхности моря в виде сплошных пятен, пленки биогенного происхождения под влиянием динамики вод чаще всего располагаются вдоль линий тока поверхностных течений, вихревых структур, кильватерных следов судов и др.

Обобщая результаты спутникового мониторинга, можно утверждать, что форма, концентрация и местоположение биогенных поверхностных загрязнений следующим образом зависят от динамики водной среды:

- в зонах конвергенции под действием течений, приводного ветра и волн концентрируются плавающий мусор, пена и пленки загрязнений;
- циклонических вихрях поверхностные загрязнения проявляются на периферии вихря;
- вихревых диполях помимо полосы загрязнений по внешнему периметру головки диполя наблюдается скопление загрязняющих веществ по краям ножки;
- прибрежных антициклонических вихрях наблюдаются скопления загрязняющих веществ в его спиралевидных затяжках.

4.5. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Анализ карт концентрации хлорофилла-*a* Черного моря, построенных по данным сенсора MODIS Aqua, указывает на два максимума активности фитопланктона в апреле-июне и октябре — начале ноября. Весенняя вспышка развития фитопланктона (продолжительностью около двух месяцев) обусловлена: накоплением биогенных веществ в течение зимнего периода, поступлением биогенных элементов в прибрежную зону с таянием снегов, достаточной концентрацией растворенного кислорода, а также прогревом приповерхностных слоев моря. Осенний пик (продолжительностью около 1,5 месяца), связан, главным образом, с заглублением термоклина и вовлечением в процессы фотосинтеза эвтрофицированных вод с более глубоких горизонтов, увеличением поступления биогенных веществ с речным стоком, а также с усилением ветрового перемешивания и поступления кислорода, при сохранении достаточно высоких значений температуры воды (*Ведерников, Демидов, 2002*). Графики изменения концентрации хлорофилла-*a* в морской воде в период с апреля по октябрь 2008 г. приведены на рис. 4.9а (см. с. 237). Для сравнения на рис. 4.9б (см. с. 237) показаны аналогичные графики за 2007 г. (http://planet.iitp.ru/sea_monitor/archive/2008/12/img7.gif).



Концентрация хлорофилла в прибрежной акватории:

- в районе г.Сочи
- в районе г.Туапсе
- в районе г.Новороссийск;
- в глубоководной части Черного моря (44°с.ш., 38°в.д.)

б

Рис. 4.9. Изменение средних (за 5 суток) значений концентрации хлорофилла-а в заданных точках северо-восточной части Черного моря с апреля по октябрь 2008 г. (а) и с апреля по октябрь 2007 г. (б)

В 2008 г. наблюдался более ранний (по сравнению с 2007 г.) прогрев приповерхностного слоя моря, что явилось причиной более ранней весенней вспышки развития фитопланктона. Осенний пик активного развития фитопланктона в 2008 г. в российском секторе Черного моря начался позже, длился дольше и был значительно интенсивнее, чем аналогичный период цветения фитопланктона в 2007 г.

4.6. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

По результатам совместного анализа спутниковых и наземных данных был обнаружен ряд экстремальных гидрометеорологических явлений, которые повлияли на динамику вод, распространение загрязнений и на курортологическую обстановку в целом. К основным экстремальным гидрометеорологическим явлениям, которые наблюдались каждый год, относятся: новороссийская бора, интенсивный апвеллинг, дождевые паводки, ветровые нагоны, смерчи.

Новороссийская бора — усиление северо-восточного ветра, скорость которого может достигать 40 м/с, наиболее часто возникает в зимнее время. Однако в период проведения мониторинга с апреля по октябрь данное явление фиксировалось неоднократно. В 2006 г. было отмечено пять случаев проявления новороссийской боры, два из которых стали причиной возникновения сгонных явлений в северо-восточной части российского сектора Черного моря. В 2007 г. новороссийская бора в 1-й декаде июня, 1-й декаде августа и 3-й декаде сентября, хотя не достигла катастрофических значений, но способствовала кратковременному усилению прибрежной ветви ОЧТ, которая переносила прогретые воды на север акватории. В открытой части Черного моря усиление северо-восточного ветра приводило к образованию многочисленных вихревых диполей в поле течений. Новороссийская бора в 2008 г. наблюдалась дважды в апреле, один раз в мае, шесть раз в августе и по пять раз в сентябре и октябре. Усиление северо-восточного ветра в эти дни было непродолжительным, а скорость ветра не достигала катастрофических значений. Бора способствовала кратковременной интенсификации прибрежной ветви ОЧТ и связанного с ним переноса прогретых вод и загрязняющих веществ из грузинского сектора Черного моря на север акватории.

Интенсивный апвеллинг (подъем холодных глубинных вод к поверхности), сопровождается понижением температуры до 10 °С от фоновых значений температуры поверхности моря. Отток теплых вод иногда происходит в форме мощных (протяженностью 50–60 км) струй в юго-западном направлении поперек шельфа. Апвеллинг приводит к тому, что глубинные воды, богатые питательными веществами и биогенными элементами, могут образовывать локальные аномалии в поле концентрации хлорофилла-*a*.

Ливневые речные паводки, а также дождевой сток выносят в море значительное количество взвесей и загрязняющих веществ, приводя к усилению перемешивания вод в прибрежной зоне и повышению их мутности. Загрязненные водные массы являются более пресными, чем морская вода, поэтому они довольно длительное время (до нескольких суток) находятся в приповерхностных слоях моря, существенно ухудшая экологическую обстановку в курортной зоне (*Бедрицкий* и др., 2009).

Самая тяжелая гидрометеорологическая ситуация сложилась 11 ноября 2007 г., когда штормовой ветер (30–32 м/с) и сильное волнение (6–7 баллов) в Керченском проливе, вызванные быстрым перемещением циклона, привели к крушению нескольких нефтеналивных судов и сухогрузов (см. гл. 8).

4.7. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Оперативный спутниковый мониторинг позволил осуществить картографирование динамических характеристик и параметров загрязнения водной среды, определить типы и масштабы загрязнений, отследить пути их миграции, пронаблюдать механизмы самоочищения вод.

Спутниковый мониторинг подтвердил, что специфика внутримассового загрязнения вод прибрежной зоны Черного моря во многом зависит от воздействия на морскую среду гидрометеорологических процессов, характеризующихся широким многообразием форм, масштабов и временем существования. Для понимания этой специфики необходимо постоянно отслеживать все эти воздействия на морскую среду, что возможно только на основе проведения регулярных спутниковых наблюдений.

Наряду с космическим мониторингом осуществлялся контроль гидрометеорологической обстановки по данным сети прибрежных метеорологических станций и гидрологических постов на реках. Сопоставление наземных данных с данными дистанционного зондирования из космоса позволило проводить валидацию последних, а также своевременно выявлять опасные погодные процессы, влияющие на экологическую обстановку в прибрежной зоне.

Многолетний спутниковый мониторинг дает возможность анализировать типовые ситуации распределения загрязнений в прибрежных водах, определять новые элементы циркуляции вод, осуществляющие перенос загрязнений и очищение от них водной среды. Выявленные закономерности динамики распределения загрязнений способствовали повышению достоверности картографирования экологической обстановки, в том числе прогнозирования динамики распространения загрязнений. Однако накопленные к настоящему времени ряды спутниковых данных еще не достаточны для исчерпывающего понимания проблемы загрязнения моря, в том числе в условиях сложной гидрометеорологической обстановки.

Разработанная технология оперативного космического мониторинга является эффективным средством контроля нефтяных загрязнений. Она позволяет оперативно осуществлять обнаружение нефтяных пятен, определять координаты и площади нефтяных разливов на момент космической съемки, устанавливать координаты источников нефтяного загрязнения (суда, добывающие платформы, нефтепроводы и др.). Суда, длина которых превышает 25 м, очень хорошо выявляются на радиолокационных изображениях ASAR Envisat и SAR ERS-2, а с помощью новейших спутниковых радиолокаторов можно выявить практически любые суда. Поэтому, если сброс загрязненных вод был произведен незадолго до радиолокационной съемки, всегда можно однозначно выявить источник загрязнений. Используя автоматическую систему позиционирования судов, можно определить конкретного виновника

загрязнения. Оперативная информация: название судна, координаты и площадь нефтяного разлива, время обнаружения, должны передаваться в контрольно-надзорные органы, как это принято во многих зарубежных странах. В России в настоящий момент это практически не осуществляется. Мы надеемся, что в перспективе, после принятия соответствующих законодательных актов, результаты космических измерений могут быть признаны в качестве доказательств экологической экспертизы при рассмотрении в судах дел, связанных с негативным антропогенным воздействием на природную среду. Эффективно действующая космическая система контроля над загрязнениями прибрежной зоны позволит также решать вопросы международной ответственности за нефтяные разливы, что важно, в частности, для Керченского пролива.

Глава 5

МНОГОСЕНСОРНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ АКВАТОРИЙ ЧЕРНОГО, БАЛТИЙСКОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ (2009–2011)

На современном этапе исследование океана нельзя представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на спутниках, специализированных для дистанционного зондирования Земли. Огромное количество поступающей с них информации используется не только в чисто научных целях, но и для решения многих хозяйственных и природоохранных задач. Наибольшую ценность представляют регулярные и оперативные наблюдения одних и тех же районов всеми доступными сенсорами, что предоставляет возможность всестороннего изучения характерных процессов и явлений, выявления взаимосвязей между ними, закономерностей и особенностей возникновения и развития. В России примерами хорошо организованных ежедневных оперативных спутниковых мониторингов морских акваторий могут служить: оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря, который проводился силами шести организаций с июня 2004 по ноябрь 2005 г. (см. гл. 3; *Костяной* и др., 2006, 2009; *Kostianoy et al.*, 2006b) и оперативный мониторинг состояния и загрязнения морской среды российского сектора Черного и Азовского морей, который проводится с 2003 г. ежегодно с апреля по октябрь под руководством коллектива НИЦ «Планета» (см. гл. 4; *Бедрицкий* и др., 2007, 2009; *Кровотынцев* и др., 2007; *Shcherbak et al.*, 2008). Специалисты из лаборатории аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН принимали активное участие в проведении обоих мониторингов, отвечая за получение, обработку и интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений. Накопленный опыт и основные наработки используются для проведения круглогодичного ежедневного оперативного спутникового мониторинга акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей, который осуществляется данным коллективом, начиная с 2009 г.

5.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Многосенсорный оперативный спутниковый мониторинг базируется в первую очередь на данных спутниковой радиолокации, получаемых с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой ASAR Envisat и SAR ERS-2, принадлежащих Европейскому космическому агентству (ЕКА). Радиолокационные изображения (РЛИ)

посредством Интернет-технологий поступают с трех европейских станций приема и первичной обработки данных ESRIN, MATERA и KIRUNA в режиме времени, близком к реальному. Возможность получения данных с этих станций предоставлена сотрудникам ИКИ РАН в рамках проекта С1Р.6342, поддержанного ЕКА. Для радиолокационных наблюдений, охватывающих акватории Черного и Азовского морей, обеспечен автоматический режим приема информации. Выбор и скачивание данных по остальным районам интереса выполняются вручную, на основе информации о расположении кадра РЛИ, получаемой с помощью on-line каталога EOLISA (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>). На сайтах перечисленных выше станций в оперативные архивы (rolling archives) РЛИ попадают примерно через час после пролета спутника и хранятся там в течение двух недель. Пространственное разрешение таких РЛИ составляет 150 м как для широкой полосы обзора (WSM), ширина охвата 430 км, так и для узкой полосы (IMM), для которой ширина охвата варьируется от 56 до 105 км в зависимости от угла съемки. Данные SAR ERS-2, получаемые из оперативных архивов, также имеют пространственное разрешение 150 м при ширине кадра 100 км. В отдельных случаях для проведения подспутниковых измерений, или для выявления мелкомасштабных деталей интересующих нас явлений, специально заказываются РЛИ высокого разрешения — 12,5 м в точке, а также на разных поляризациях излучения и приема. Возможность заказа целевой съемки и получения данных высокого разрешения предоставлена ЕКА в рамках соответствующих научных проектов: С1Р.5004, АОВЕ 2775 и С1Р.1027.

Для проведения оперативного спутникового мониторинга помимо РЛИ используются данные следующих сенсоров и измерений:

- спектрорадиометров MODIS Terra/Aqua, выставляемые в режиме реального времени на сайте <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>. Используются композиты 3-го, 2-го и 1-го каналов, пространственное разрешение 250 м;
- сканирующего спектрометра MERIS Envisat. В основном используются композиты 7-го, 5-го и 2-го каналов, разрешение которых составляет 260 м. Данные MERIS Envisat скачиваются с сайта <http://miravi.eo.esa.int>, где представлены цветосинтезированные изображения 7-го, 5-го и 2-го каналов или из оперативных архивов. Данные MERIS Envisat, находящиеся в соответствующих оперативных архивах, содержат информацию всех 15 спектральных каналов, что дает возможность более детальной обработки и анализа этих изображений;
- сканирующих радиометров TM Landsat-5 и ETM+ Landsat-7. Эти данные были получены с открытого Интернет-ресурса <http://glovis.usgs.gov>. Сенсор ETM+ функционирует в восьми каналах: (1-й) 0,450–0,515 мкм; (2-й) 0,525–0,605 мкм; (3-й) 0,630–0,690 мкм; (4-й) 0,760–0,900 мкм, (5-й) 1,550–1,750 мкм; (6-й) 10,400–12,500 мкм; (7-й) 2,080–2,350 мкм; (8-й) 0,520–0,900 мкм. Разрешение данных 1–5-го и 7-го каналов — 30 м, 6-го — 60 м, монохроматические данные 8-го канала имеют разрешение 15 м. Радиометр TM Landsat-5 осуществляет съемку в тех же спектральных каналах, основное отличие состоит в отсутствии монохроматического 8-го канала и более низким разрешением 6-го канала — 120 м (см. гл. 2). Для решения различных научных задач строятся композиты разных каналов. Например, для выявления поверхностных проявлений внутренних волн используются композиты 3-го, 2-го и 1-го каналов;

- данные гидрофизических зондирований;
- гидрометеоданные прибрежных метеостанций;
- для интерпретации РЛИ используются карты поверхностной температуры (SST), нормализованной яркости восходящего излучения и хлорофилла-*a*, получаемые с сайтов <http://dvs.net.ua/mp/index.shtml> и <http://smiswww.iki.rssi.ru/>; карты ледяного покрова — http://www.smhi.se/oceanografi/iceservice/is_prod_en.php.

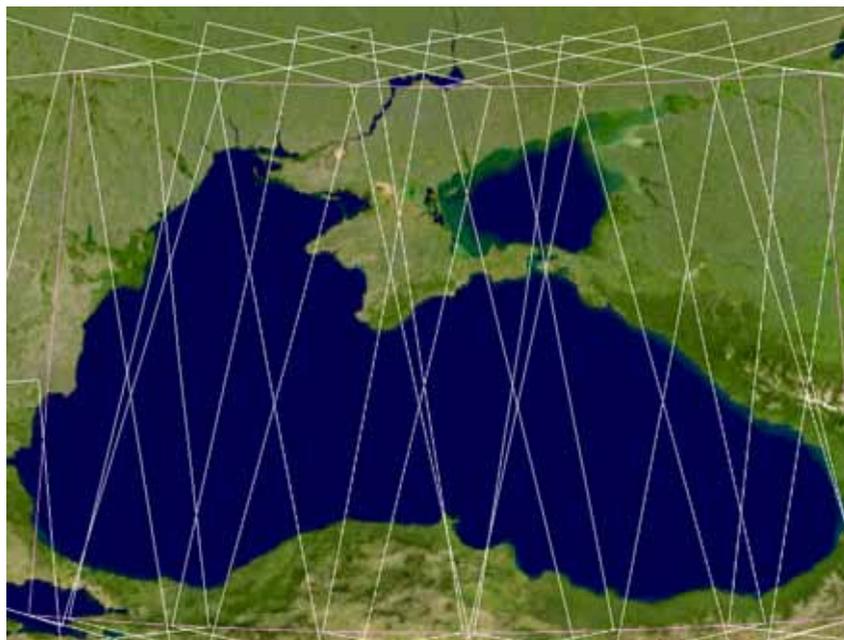
Спутниковые данные подвергаются следующей обработке:

- координатная привязка радиолокационных изображений по навигационным данным, содержащимся в служебной информации к каждому кадру, в результате изображение представляется в координатах долготы-широты;
- подбор гистограммы с целью наилучшего визуального восприятия основных информативных сигнатур на морской поверхности;
- нанесение координатной сетки;
- географическая привязка и приведение данных различных приборов дистанционной диагностики, полученных в разных диапазонах зондирования и обладающих различным пространственным разрешением к виду, позволяющему проведение их совместного анализа;
- комплексная обработка и совместный анализ разнородных спутниковых изображений и интеграция результатов обработки спутниковых данных с информацией, полученной из других источников;
- тематическая обработка спутниковых данных, включающая в себя интерактивное дешифрирование многозональных спутниковых изображений.

Вся информация об имеющихся данных и результаты тематической обработки заносятся в каталог. Все полученные радиолокационные данные сведены в альбомы, содержащие как сами изображения, так и результаты их дешифровки. Обработанные спутниковые радиолокационные данные, полученные над акваторией Черного моря, представлены в Европейской системе океанологических данных SeaDataNet (<http://www.seadatanet.org>). Подготовка и представление данных осуществляется в рамках международного проекта Upgrade Black Sea Scene (<http://www.blackseascene.net>), участниками которого являются сотрудники ИКИ РАН.

5.2. РАЙОНЫ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Основные районы проведения круглогодичного ежедневного оперативного спутникового мониторинга — Черное, Каспийское и Балтийское моря. По возможности также обнаруживаются динамические процессы и явления в прилегающих к основным районам интереса акваториях: в Азовском море, восточной части Средиземного моря, датских проливах и восточной части Северного моря. На рис. 5.1 (см. с. 244) представлено покрытие Черного и Азовского (рис. 5.1*a*), Балтийского (рис. 5.1*b*) и Каспийского морей (рис. 5.1*в*) изображениями ASAR Envisat WSM за 35-суточный цикл.



a



б



в

Р и с . 5.1. Покрытие изображениями ASAR Envisat WSM за 35-суточный цикл: *a* — акватории Черного и Азовского морей; *б* — Балтийского моря; *в* — Каспийского моря

В табл. 5.1 приведено общее количество РЛИ, полученных в разных районах с начала 2009 г. по настоящее время. Как видно из таблицы, объем информации год от года увеличивается, в первую очередь за счет данных над акваторией Балтийского моря. Помимо указанных в таблице, было получено более 20 РЛИ высокого разрешения интересующих нас районов Черного и Каспийского морей.

Таблица 5.1. Сводная таблица радиолокационных изображений, полученных в 2009–2011 гг.

Район	2009 г.			2010 г.			2011 г. (с 01 января по 01 июня)		
	ERS-2 SAR IMM	Envisat ASAR WSM	Envisat ASAR IMM	ERS-2 SAR IMM	Envisat ASAR WSM	Envisat ASAR IMM	ERS-2 SAR IMM	Envisat ASAR WSM	Envisat ASAR IMM
Черное море	88	97	156	110	124	130	49	118	54
Каспийское море	Съемка не проводилась	153	13	Съемка не проводилась	194	28	Съемка не проводилась	89	16
Балтийское море	71	292	7	140	505	15	44	262	5

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА

Мониторинг, который непрерывно проводится с февраля 2009 г., позволил выявить и изучить следующие процессы и явления: внутренние волны (ВВ) в неприливных морях; внутренние волны в атмосфере; мезо- и мелкомасштабные вихри и вихревые диполи; процессы, связанные с выносами пресных вод реками; цветение фитопланктона; образование ледяного покрова и динамика морских льдов. Особое внимание уделяется выявлению антропогенных и естественных загрязнений морской поверхности. Остановимся кратко на некоторых наиболее интересных результатах.

5.3.1. Внутренние волны в неприливных морях

Внутренние волны являются неотъемлемой частью динамики всех стратифицированных по плотности водоемов — океанов, морей, озер и водохранилищ. Они играют важную роль в перемешивании вод и формировании термохалинной циркуляции водоемов. Амплитуда внутренних волн может достигать в океане сотен метров, длины волн — многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, внутренние волны проявляются на поверхности океана, модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями (см. гл. 2, *Басович* и др., 1982; *Горшков* и др., 2003). Формирующиеся в зонах расхождения орбитальных течений (зоны дивергенции) полосы выглаженной ряби (слики), как и полосы повышенной

интенсивности ряби (сулои), возникающие в местах схождения (зоны конвергенции) течений, очерчивают пространственную структуру внутренних волн и движутся вместе с ними.

Причины возникновения внутренних волн разнообразны. Они могут быть вызваны приливами и инерционными движениями, колебаниями атмосферного давления, ветра, подводными землетрясениями, обтеканием течением неровностей дна, антропогенными воздействиями и т. п. (Гидродинамика океана, 1978; *Коняев, Сабинин*, 1992). В прибрежных акваториях океанов и приливных морей преобладают внутренние волны, возникающие при взаимодействии приливных течений с краем шельфа. Эти волны изучались в ходе многих натуральных, лабораторных и численных экспериментов, а их география неплохо отражена в Атласе внутренних волн (*Jackson, Apel*, 2002b), в котором обобщены данные многочисленных наблюдений внутренних волн в Мировом океане. В то же время сведения о поверхностных проявлениях внутренних волн в бесприливных морях, таких, например, как Черное, Балтийское и Каспийское, практически отсутствуют.

Использование данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности существенно расширило наше представление о таком важном явлении, как внутренние волны в океане. В последнее время удалось выявить поверхностные проявления внутренних волн не только в хорошо изученных и подробно описанных в научной литературе районах Мирового океана, но и в замкнутых бассейнах: морях и больших озерах. Наблюдаемые внутренние волны в бесприливных бассейнах существенно менее интенсивны, чем их аналоги в океане или в морях с приливами, однако более разнообразны с точки зрения механизмов своего происхождения. Начиная с 70-х гг. прошлого века в шельфовых зонах Каспийского и Черного морей на протяжении многих лет проводились длительные и детальные исследования внутренних волн контактными методами (*Коняев*, 1975, *Иванов* и др., 1981; *Иванов, Серебряный*, 1982, 1983, 1985). В том числе с применением пространственных антенн распределенных датчиков температуры (*Коняев, Сабинин*, 1973), которые позволили не только подробно исследовать пространственно-временные характеристики волн, но также изучить процессы, ответственные за генерацию цугов интенсивных внутренних волн. Главной особенностью поля внутренних волн в бесприливном море является относительно невысокий уровень их амплитуд по сравнению со своими аналогами в океане. Эта особенность впервые была выявлена в работе (*Иванов, Серебряный*, 1982) путем сравнения измеренных частотных спектров короткопериодных внутренних волн Черного моря (измерения проводились на шельфе и в глубоководной части моря) с модельным спектром Гарретта–Манка (*Garrett, Munk*, 1972). Другая выявленная особенность — широкое распространение эффектов нелинейности во внутренних волнах на шельфе бесприливного моря, аналогично тому, как это имеет место в море с приливами (*Серебряный*, 1990, 1993). Эффекты нелинейности (вертикальная и горизонтальная асимметрия профилей волн), а также «солитоноподобность» волн проявляются в интенсивных волнах, входящих в цуги, генерируемых при «определенных обстоятельствах».

Под «определенными обстоятельствами» понимается совокупность процессов, ответственных за генерацию интенсивных внутренних волн в бесприливном море. Эти процессы были выявлены путем длительных наблюдений, проведенных со стационарных платформ в Каспийском и Черном морях. Эффективным механизмом

генерации цугов интенсивных внутренних волн в бесприливном море служат выходы на шельф длинных внутренних волн — внутренних сейш и квазиинерционных внутренних волн (Иванов и др., 1981; Иванов, Серебряный, 1985), которые появляются, как правило, в послештормовую погоду. Выходящие на шельф длинные внутренние волны в бесприливном море играют ту же роль что и внутренние приливы на шельфе океана. По мере распространения к берегу, они сначала претерпевают нелинейную эволюцию, превращаясь из квазисинусоидальных в нелинейные волны, а затем генерируют пакеты солитоноподобных внутренних волн. В условиях узкого приглубого шельфа генерация волн максимальных амплитуд связана с подходом в прибрежную зону локальных фронтов сгонно-нагонного происхождения, наблюдающихся в периоды снятия ветрового напряжения и восстановления нарушенной сгоном или нагоном стратификации (Иванов, Серебряный, 1985; Власенко и др., 1997). В условиях широкого шельфа возможна генерация интенсивных внутренних волн движущейся поверхностной интрузией распресненных прибрежных вод (Иванов, Серебряный, 1983; Kao et al., 1978).

Экспериментальные исследования, как правило, проводятся на ограниченных акваториях и привязаны к местам устойчивой генерации приливных внутренних волн. В то же время, разнообразие условий в реальном океане, влияние огромного числа факторов как атмосферного, так и внутритрокеанического происхождения, при большой сложности и стоимости натурных измерений создают определенную фрагментарность сведений о процессах, приводящих к возбуждению внутренних гравитационных волн.

Только регулярный спутниковый мониторинг морской поверхности, проводимый сотрудниками лаборатории аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН с 2005 г. в северо-восточной части Черного моря, а с 2009 г. на всей акватории Черного, Балтийского и Каспийского морей, позволил не только впервые обнаружить поверхностные проявления внутренних волн на радиолокационных и оптических изображениях в бесприливных морях, но и восстановить картину их пространственной и временной изменчивости. Кроме того, комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК-данные), пространственному разрешению и ширине полосы съемки, дало уникальную возможность восстановить целостную картину метеорологических и гидродинамических явлений и процессов в районах интереса. На основе анализа всей совокупности параметров, полученных из данных дистанционного зондирования, определены возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых внутренних волн непривливно происхождения, и сделаны предположения о соответствующих механизмах генерации. (Лаврова и др., 2009б, 2011а, б; Митягина, Лаврова, 2009, 2010; Mityagina et al. 2010).

В результате проведения многолетнего мониторинга было выявлено, что поверхностные проявления ВВ в различных морях существенно различаются по своим пространственным характеристикам. Однако удалось установить общий для всех районов наблюдения факт: максимальная встречаемость поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина (Лаврова и др., 2009б; Митягина, Лаврова, 2010). Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствуют развитию сильных орбитальных течений

в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн на РЛИ морской поверхности. Ниже представлены результаты наблюдений ВВ в Черном, Каспийском и Балтийском морях.

Поверхностные проявления внутренних волн в Черном море (2005–2011)

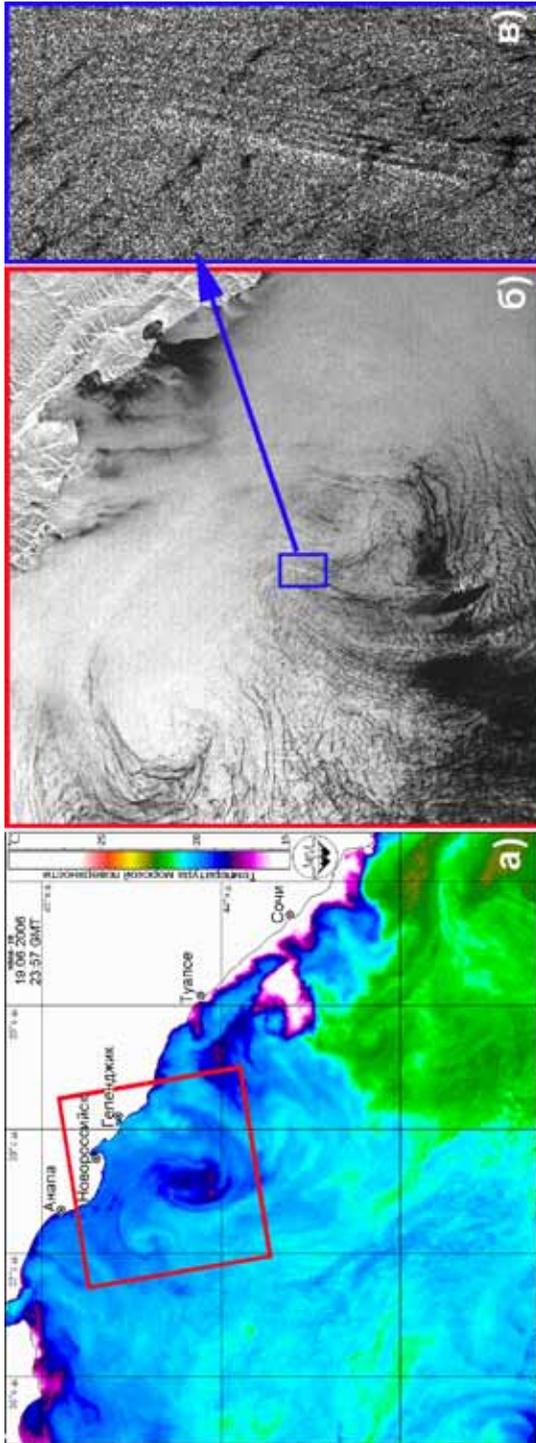
Поскольку, как отмечалось выше, до 2009 г. регулярный мониторинг Черного моря осуществлялся авторами только в северо-восточной его части, то и первые поверхностные проявления внутренних волн (ППВВ) были выявлены в этом районе. Следует отметить, что факт регистрации ППВВ на радиолокационных изображениях северо-восточной части Черного моря — относительно редкое событие. В 2005 г. впервые был идентифицирован единичный случай поверхностного проявления цуга внутренних волн на ASAR Envisat изображении, полученном 24 августа 2005 г. в 19:07 UTC. В 2006 г. при проведении мониторинга выявлению и идентификации пакетов внутренних волн на РЛИ уделялось особое внимание. В 2006 г. были зарегистрированы шесть случаев ППВВ, четыре из которых приходятся на июнь месяц — соответственно 03.06.2006 г.; 13.06.2006 г.; 16.06.2006 г. и 19.06.2006 г. и два на июль — 02.07.2006 г. и 11.07.2006 г. Причем при сопоставлении радиолокационных данных с картами температуры поверхности моря, восстановленными по данным AVHRR NOAA, полученным в близкое к проведению радиолокационных съемок время, оказалось, что все поверхностные проявления внутренних волн в 2006 г. были локализованы вблизи границы вихря или гидрологического фронта. Таким образом, был открыт фронтальный механизм генерации ВВ в непривливых морях, при котором ВВ возбуждаются нестационарным (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям) фронтом (*Lavrova, Sabinin, 2008, Лаврова и др., 2009б*).

На рис. 5.2–5.4 (см. с. 249–250) приведены примеры ППВВ вблизи вихревых структур и границы фронта.

19 июня 2006 г. в северо-восточной части Черного моря наблюдалось развитие крупного вихревого диполя (см. рис. 5.2). На РЛИ (см. рис. 5.2б) этот диполь «прорисован» сликами пленок биогенного происхождения, сконцентрированными в зонах конвергенции (*Lavrova et al., 2008a; Лаврова, 2005*). Эти линии совпадают с линиями максимальных контрастов на карте ТПМ (см. рис. 5.2а). На внутренней границе антициклонической составляющей диполя, которой на ТПМ соответствует область пониженной температуры, обнаружены поверхностные проявления внутренних волн (см. рис. 5.2в). Пакет состоял из шести волн, средняя длина которых была 175 м, и распространялся в западном направлении.

02 июля 2006 г. практически в том же районе обнаружены поверхностные проявления внутренних волн, распространяющихся в восточном направлении (см. рис. 5.3б). Средняя длина волн составляла 150 м. Поскольку радиолокационные контрасты невелики, количество волн в пакете можно оценить только приблизительно: 6–7. На карте ТПМ, восстановленной по данным AVHRR NOAA, полученным через 78 мин после пролета спутника Envisat (см. рис. 5.3а), положение пакета отмечено звездочкой. Видно, что пакет располагается на границе холодного вихря.

11 июля 2006 г. на ASAR Envisat изображении, полученном в 19:19 UTC южнее Керченского пролива, были обнаружены пересекающиеся пакеты внутренних волн, имеющие вид классических цугов солитонов (см. рис. 5.4). При сопоставлении радиолокационных данных с картами ТМП, восстановленными по данным AVHRR NOAA,



Р и с . 5.2. Проявление внутренних волн на границе антициклонической составляющей вихревого диполя: *а* — проявление вихревого диполя в поле температуры, восстановленной по данным AVHRR NOAA от 19.06.2006 г. в 23:57 UTC, красный прямоугольник соответствует положению кадра РЛИ; *б* — РЛИ ASAR Eplvisat, полученное 19.06.2006 г. в 19:10 UTC с разрешением в точке 12,5 м; *в* — РЛ-образы поверхностных проявлений пакета *BB*

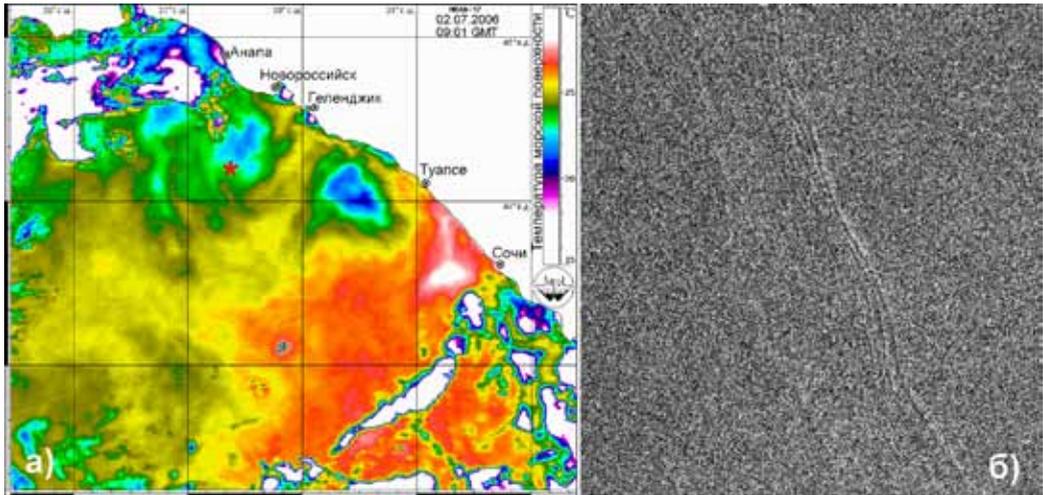


Рис. 5.3. Проявление внутренних волн на границе холодного вихря: *а* — поле поверхностной температуры, восстановленное по данным AVHRR NOAA от 02.07.2006 г. в 09:01 UTC, звездочкой отмечено положение пакета ВВ; *б* — фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 02.07.2006 г. в 7:43 UTC с разрешением в точке 12,5 м, содержащий РЛ-образы поверхностных проявлений пакета ВВ

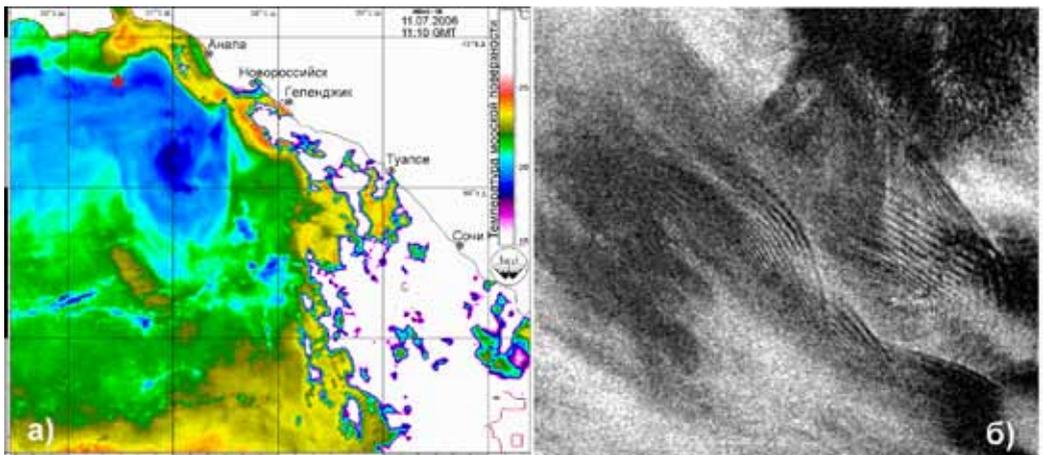


Рис. 5.4. Поверхностные проявления пересекающихся пакетов внутренних волн вблизи холодного фронта: *а* — поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 11.07.2006 г. в 11:10 UTC, звездочкой отмечено положение пакета ВВ; *б* — фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 11.07.2006 г. в 19:19 UTC с разрешением в точке 75 м, содержащий РЛ-образы поверхностных проявлений пакетов внутренних волн

полученным в близкое к проведению радиолокационных съемок время, оказалось, что поверхностные проявления внутренних волн располагались непосредственно на границе фронта, разделяющего холодные и теплые воды.

В ходе дальнейших регулярных радиолокационных наблюдений в северо-восточной части Черного моря удалось идентифицировать только по одному случаю ППВВ — в августе 2007 и в июне 2009 г. Основные характеристики ППВВ, выявленных в северо-восточной части Черного моря, представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Характеристики ППВВ, выявленных в северо-восточной части Черного моря на РЛИ ASAR Envisat

Дата	Время (UTC)	Координаты центра пакета	Глубина места, м	Ширина пакета, м	Максимальная длина волны, м	Число волн в пакете
2006.06.03	07:54:43	44° 53' 16" с. ш. 36° 47' 22" в. д.	100	1100	500	4
2006.06.13	07:40:43	43° 43' 02" с. ш. 38° 14' 11" в. д.	2000	3260	170	20
2006.06.16	19:05:03	44° 38' 01" с. ш. 37° 51' 12" в. д.	50	814	285	5
2006.06.19	19:10:45	44° 13' 56" с. ш. 37° 34' 46" в. д.	2000	1300	220	6
2006.07.02	07:43:36	44° 12' 24" с. ш. 37° 28' 52" в. д.	1800	1057	175	7
2006.07.11	19:19:04	44° 48' 18" с. ш. 36° 17' 22" в. д.	60	3183	430	>10
		44° 50' 46" с. ш. 36° 22' 58" в. д.	50	4593	500	>10
		44° 47' 51" с. ш. 36° 26' 58" в. д.	70	4902	510	>10
2007.08.10	07:46:24	44° 35' 04" с. ш. 37° 52' 48" в. д.	200	1166	265	6
2009.06.08	07:50:44	45° 02' 24" с. ш. 36° 37' 30" в. д.	50	1875	320	6

В северо-восточной части Черного моря внутренние волны проявлялись в виде изолированных цугов, содержащих до 20 волн, при этом максимальная длина волны в цуге не превышала 500 м. Фронт ведущей волны, как правило, был существенно искривлен, длина его варьировалась в пределах от 7 до 18 км. Ширина пакетов в зависимости от количества волн в цуге изменялась от 815 м до 5 км.

Карта пространственного распределения ППВВ неприливного происхождения, выявленных по радиолокационным данным в северо-восточной части Черного моря, приведена на рис. 5.5 (см. с. 252). Как видно из рисунка, в этой части акватории Черного моря можно выделить три района, где сосредоточены ППВВ:

- I — район Керченского предпроливья над изобатами 50–100 м;
- II — вблизи Цемесской бухты над изобатами 40–50 м;
- III — на расстоянии 25–28 миль к юго-западу от участка береговой черты в районе Новороссийск-Туапсе над изобатами 1800–2000 м.

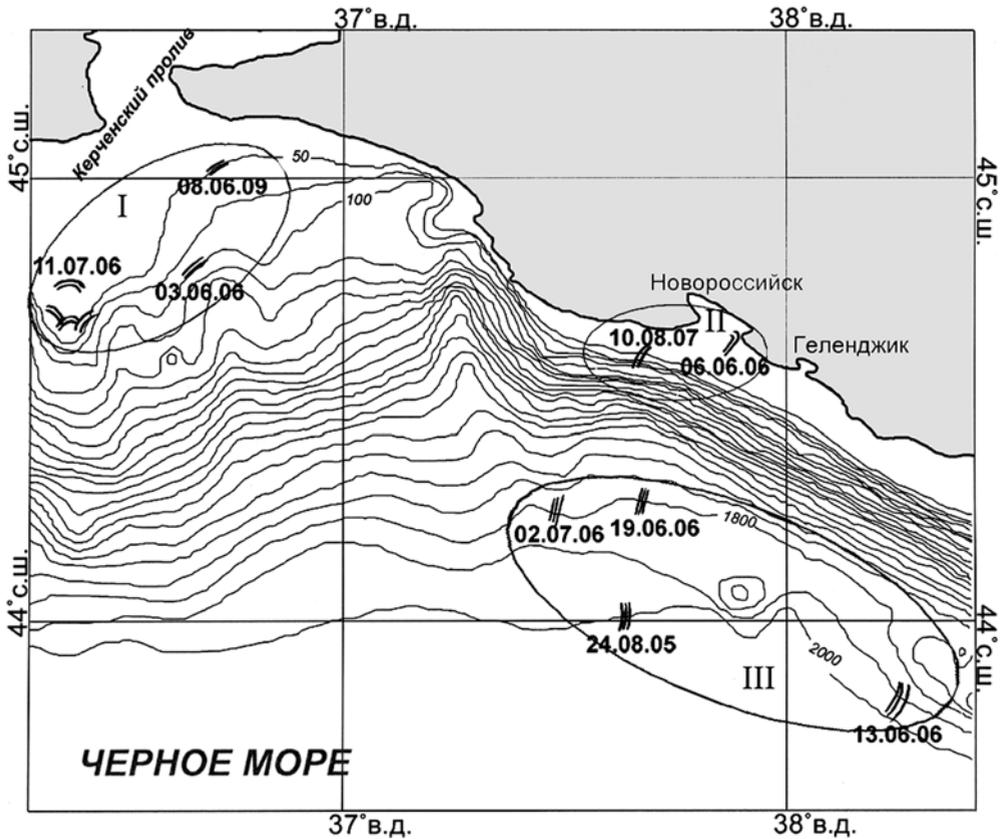
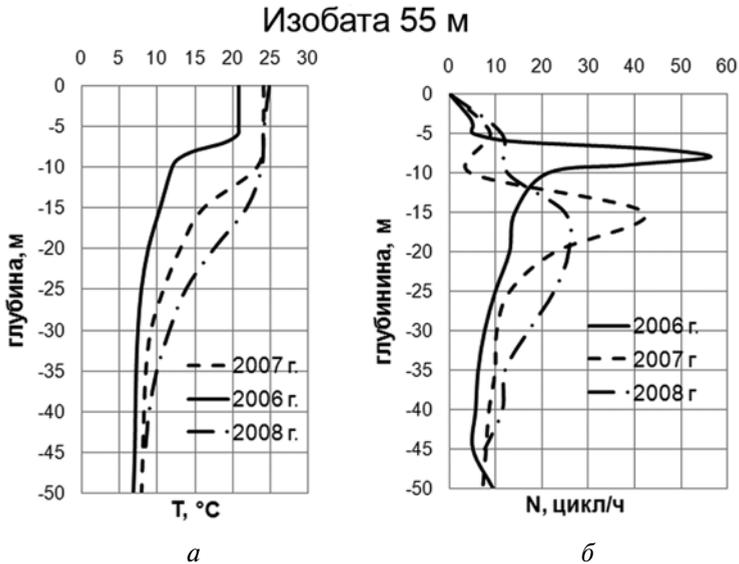


Рис. 5.5. Обобщенная карта-схема распределения ППВВ, выявленных по данным спутниковой радиолокации в северо-восточном секторе Черного моря

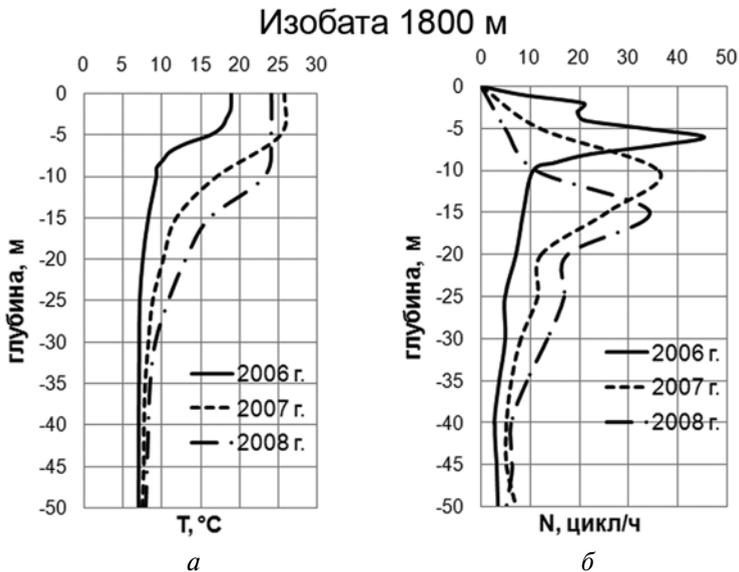
Наибольший интерес представляют ППВВ, локализованные в глубоководной области (III). Результаты совместного анализа данных спутниковой радиолокации и ИК-сенсоров, полученных в близкие моменты времени, свидетельствуют о том, что все зарегистрированные в этом районе поверхностные проявления внутренних волн локализованы вблизи границы мезомасштабного вихря или вихревого диполя (Lavorova, Sabinin, 2008; Лаврова и др., 2009б; Митягина, Лаврова, 2010).

Вихревые структуры и фронты, подобные рассмотренным выше, регулярно возникают в северо-восточной части Черного моря, однако поверхностные проявления связанных с ними внутренних волн наблюдаются достаточно редко. Как уже отмечалось, практически все случаи поверхностных наблюдений внутренних волн в данном районе зарегистрированы авторами в 2006 г. Для того чтобы установить причину столь существенной межгодовой изменчивости в количестве ППВВ, выявляемых на РЛИ морской поверхности, к рассмотрению были привлечены данные гидрофизического зондирования на постоянном гидрологическом разрезе «Геленджик – центр моря», полученные в июне-июле 2006–2009 гг. во время рейсов научно-исследовательских судов ЮО ИО РАН (взяты из отчетов ЮО ИО РАН за 2006, 2007, 2008 гг.).

На рис. 5.6 и 5.7 представлены профили температуры (рис. 5.6а и 5.7а) и частоты плавучести (рис. 5.6б и 5.7б), построенные по данным измерений на изобате 55 м и на изобате 1800 м, что соответствует областям I и III соответственно рис. 5.5.

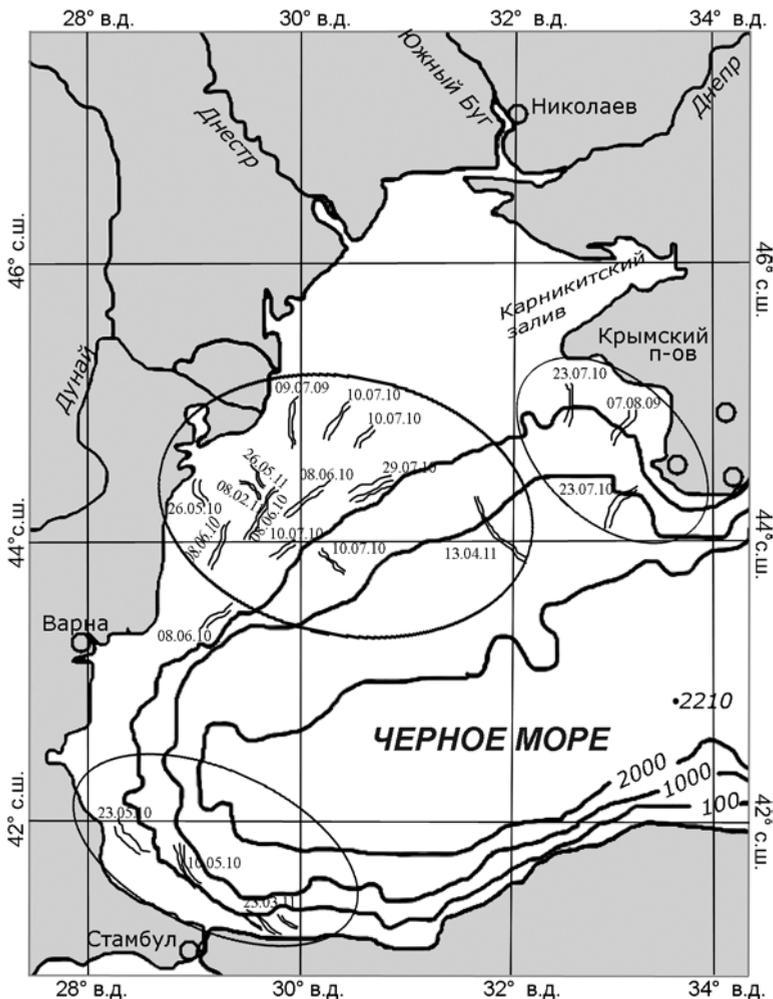


Р и с . 5.6. Вертикальные профили температуры воды по данным контактных измерений (а) и частоты плавучести (б) над изобатой 55 м



Р и с . 5.7. Вертикальные разрезы температуры воды по данным контактных измерений (а) и частоты плавучести (б) над изобатой 1800 м

Частота плавучести $N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ определяет верхний предел существования свободных внутренних инерционно-гравитационных волн в море. Хорошо видно, что структура пикноклина в июне 2006 г., когда было выявлено большинство ППВВ, обладает рядом существенных отличий. Причем эти отличия выражены для гидрофизических характеристик, полученных для разных глубин — пик частоты плавучести очень острый и находится на глубине всего 5–8 м. Таким образом, можно утверждать, что максимальная встречаемость ППВВ соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина. Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку



Р и с. 5.8. Обобщенная карта-схема распределения ППВВ, выявленных на РЛИ в западной части Черного моря в 2009–2011 гг.

способствуют развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн на РЛИ морской поверхности.

Начиная с 2009 г. регулярному спутниковому мониторингу подвергается вся акватория Черного моря. Основные районы, в которых в 2009–2011 гг. выявлены ППВВ на спутниковых изображениях, это акватории, прилегающие к полуострову Крым, дельте Дуная и черноморское предпроливье Босфора. На рис. 5.8 (см. с. 254) представлена обобщенная схема распределения ППВВ, выявленных на РЛИ в западной части Черного моря в 2009–2011 гг. (в 2011 г. информация по 1 июня). Всего за данный период более 15 РЛИ содержали радиолокационные образы ППВВ. Вероятные механизмы генерации ВВ: релаксация прибрежного апвеллинга, инерционные колебания, связанные с гидрологическими фронтами (в частности с фронтом, возникающим при выносе пресных вод Дунаем), сгонно-нагонные явления.

На рис. 5.9 приведен пример цуга внутренних волн вблизи Севастополя. Изображение со спутника ASAR Envisat получено 07 августа 2009 г. в 08:06 UTC на вертикальной поляризации с разрешением 12,5 м в точке. Цуг содержит 6 волн, максимальная



Рис. 5.9. Проявление цуга внутренних волн вблизи Севастополя (отмечен стрелочкой). Фрагмент ASAR Envisat изображения (36×27 км), полученного 07.08.2009 г. в 08:06 UTC с разрешением в точке 12,5 м

длина которых 370 м, длина фронта ведущей волны 21 800 м. Цуг расположен над изобатой 100 м, его искривленная форма вызвана взаимодействием течений с неровностями дна. Контактные измерения, которые проводились Серебряным А. Н. (АКИН, ИКИ РАН) на платформе Качивели, показали, что в период, предшествующий моменту регистрации ППВВ, в этом районе наблюдался сильный прибрежный апвеллинг. Таким образом, наиболее вероятной причиной генерации данного цуга может быть релаксация прибрежного апвеллинга.

Совершенно другая картина наблюдается на румынском шельфе в районе дельты Дуная. Наибольшее количество ППВВ регистрируется именно здесь. Причем на одном РЛИ могут наблюдаться ППВВ, распространяющиеся в разных направлениях. Поскольку пакеты внутренних волн наблюдаются в данном районе регулярно, не только в летний период, когда существует ярко выраженный сезонный термоклин, но и в зимний (в январе и феврале 2011 г.), можно предположить, что источником генерации ВВ является интрузия распресненных вод, связанная с ранним выносом Дуная. Генерация ВВ фронтом, связанным с выносом распресненных вод крупными реками, — достаточно распространенное явление. Теория этого явления описана, например, в работах (*Nash, Moum, 2005; Stashchuk, Vlasenko, 2009*), а спутниковые наблюдения анализируются в работе (*Pan et al., 2007*). На изображениях, представленных на рис. 5.10, полученных 04 июня 2010 г. (рис. 5.10а) и через 4 дня 08 июня 2010 г. (рис. 5.10б, см. с. 257) хорошо видны многочисленные пакеты ВВ, распространяющиеся в различных направлениях. Это связано как с сильной неоднородностью речного выноса, так и с особенностями топографии дна. На цветосинтезированном изображении ТМ Landsat-5 (3-й, 2-й, 1-й спектральные каналы) прекрасно различаются

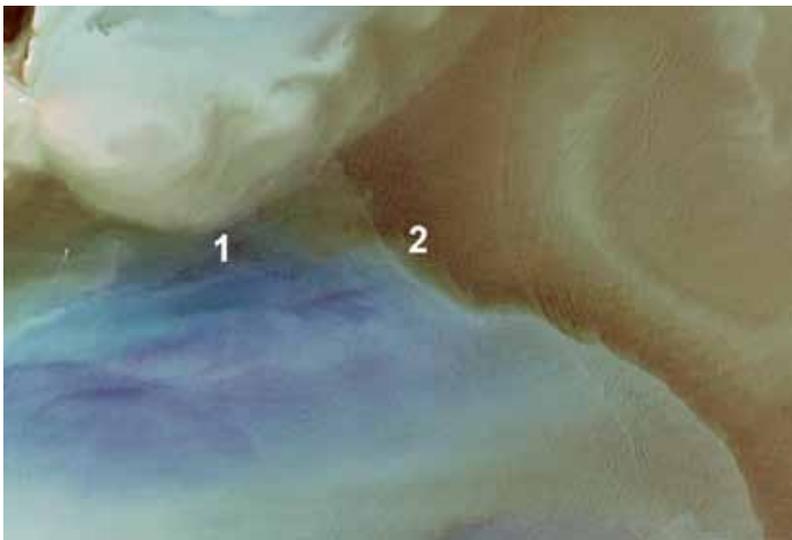
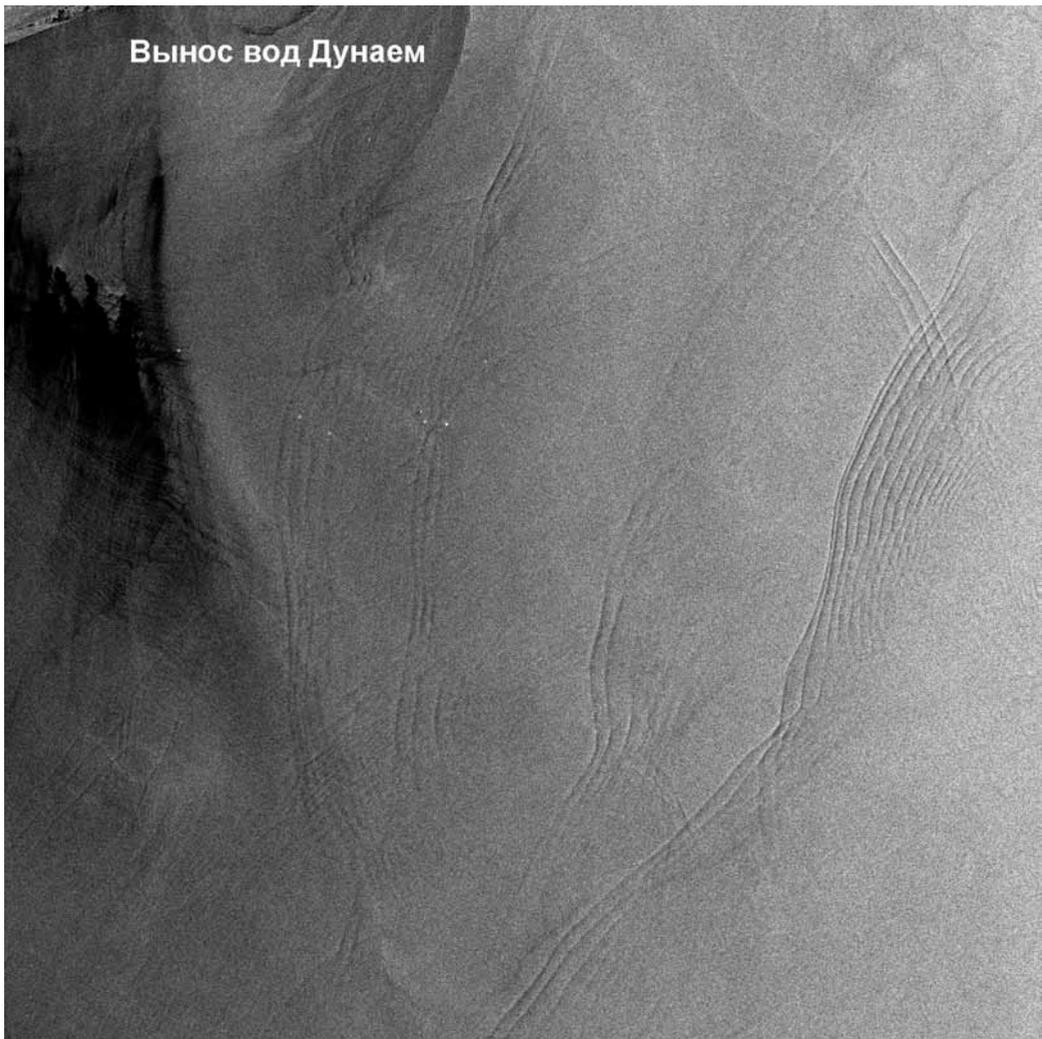


Рис. 5.10а. Проявление многочисленных цугов внутренних волн вблизи дельты Дуная: фрагмент цветосинтезированного изображения ТМ Landsat-5 (3-й, 2-й, 1-й спектральные каналы), полученного 04.06.2010, цифрами 1 и 2 отмечены цуги, расположенные на границе переднего фронта мутных вод

мутные пресные воды Дуная. Многие цуги ВВ (например обозначенные цифрами 1 и 2 на рис. 5.10а) располагаются прямо на границе переднего фронта мутных вод и распространяются вместе с этим фронтом. На РЛИ большая часть цугов ВВ распространяется не с водами Дуная, а, наоборот, к берегу. Скорее всего, в данном районе одновременно может существовать несколько механизмов генерации ВВ.

Хотелось бы отметить, что на РЛИ область речного выноса не всегда хорошо идентифицируется. Совместный анализ оптических и РЛИ-изображений дает возможность более детального изучения данного явления.



Р и с . 5.10б. Проявление многочисленных цугов внутренних волн вблизи дельты Дуная: фрагмент ASAR Envisat изображения (75×75 км), полученного 08.06.2010 г. в 08:20 UTC с разрешением в точке 12,5 м



Рис. 5.11. Цуги внутренних волн у Босфора. Фрагмент SAR ERS-2 изображения, полученного 23.03.2011 г. в 08:50 UTC с разрешением в точке 75 м

В Босфорском предпроливье ППВВ встречаются не так часто, как на румынском шельфе, обычно наблюдается одиночный пакет, состоящий из 5–8 волн, с максимальной длиной волны 500–800 м. Они менее интенсивны, распространяются как от пролива, так и к нему и располагаются, как правило, вдоль изобат. Пример ППВВ в данном районе представлен на рис. 5.11.

ППВВ в Каспийском море (2009–2011)

В 70-е гг. прошлого века достаточно активно проводились контактные измерения внутренних волн в Каспийском море, в основном в Среднем Каспии (Коняев, 1975). В ходе проведения регулярного мониторинга авторами впервые были выявлены на спутниковых изображениях ППВВ в Каспийском море (Лаврова и др., 2010, 2011б; Lavrova et al., 2010b). В отличие от ППВВ в Черном море, на Каспии они отличаются частотой проявлений и большим разнообразием. На одном кадре РЛИ (430×400 км) часто наблюдаются несколько цугов ВВ, что свидетельствует о наличии нескольких мест генерации, расположенных на относительно небольшом расстоянии. Общее число обнаруженных цугов ВВ оценить трудно, поскольку практически на всех РЛИ Среднего Каспия, полученных в период с середины мая по конец августа, присутствовали ППВВ. Как правило, они имели вид классических цугов солитонов, для взаимодействующих цугов наблюдались характерные для нелинейных

взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр. Как правило, цуги распространяются к берегу и встречаются над глубинами 50–200 м. Длина ведущей волны в цуге может достигать 1,5 км, а протяженность фронтов — до 50 км (рис. 5.12). Ширина цуга зависит от количества волн, входящих в него, в среднем она составляет 2,5 км, но может достигать и 6 км. Основные характеристики ППВВ, выявленных на спутниковых изображениях в 2009 г. и для сравнения в 2003 и 2007 гг., представлены в табл. 5.3 (см. с. 260–261).

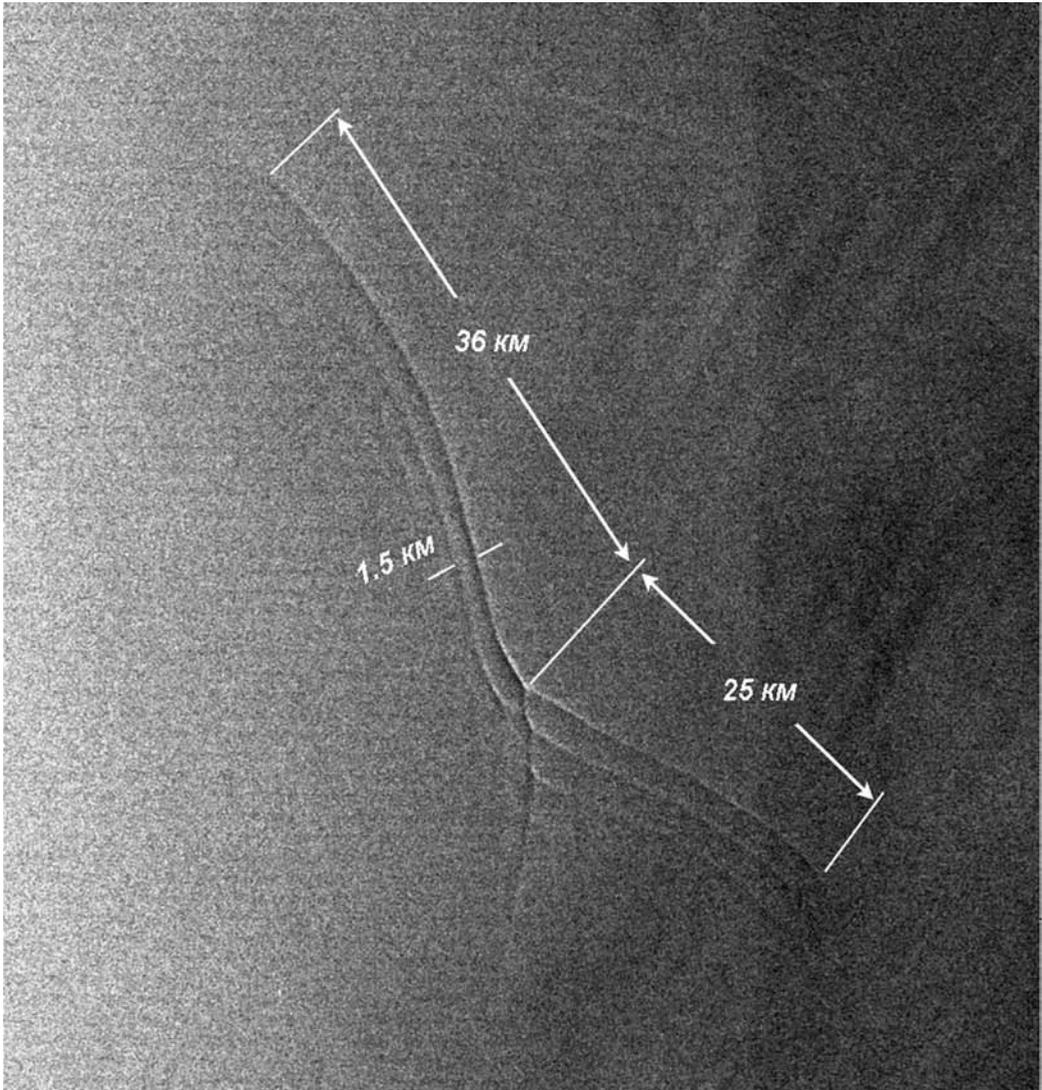


Рис. 5.12. Характерные пространственные характеристики поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море. Фрагмент изображения ASAR Envisat (65×65 км), полученного 24.07.2009 г. в 18:23 UTC с разрешением в точке 75 м

Таблица 5.3. Характеристики внутренних волн, выявленных в Каспийском море на спутниковых изображениях

Дата	Время (UTC)	Число пакетов на снимке	Местоположение пакетов	Глубина места, м	Ширина пакета, м	Максимальная длина волны, м	Число волн в пакете
22.08.2003	06:45	>6	38°22' с. ш.; 51°58' в. д.	80	различная	1500	различное
04.07.2007	18:26	3	40°00' – 41°00' с. ш.; 50°07' – 52°00' в. д.	140–200	3500; 1900; 1500	1500; 1000; 600	3; 5; 3
21.05.2009	18:33	3	37°55' – 38°30' с. ш.; 49°01' – 49°17' в. д.	40–80	1200; 1500; 1400	450; 375; 300	6; 9; 7
22.05.2009	06:45	4	40°12' – 41°40' с. ш.; 51°25' – 52°07' в. д.	70–180	3800; 2250; 3008	1200; 750; 1300	5; 7; 5;
28.05.2009	18:14	3	39°55' – 40°18' с. ш.; 51°40' – 51°59' в. д.	80	1300	220	4; 8; 7
31.05.2009	07:03	>12	39°20' – 40°45' с. ш.; 51°10' – 52°06' в. д.	70–200	различная	750	различное
16.06.2009	18:17	1	40°02' с. ш.; 51°50' в. д.	80	1000	1000	2
26.06.2009	06:45	1	39°47' с. ш.; 52°26' в. д.	50	3340	900	7
02.07.2009	18:14	3	39°45' – 40°15' с. ш.; 51°53' – 52°30' в. д.	50	2260; 1200; 1900	900; 1200; 675	4; 2; 3
05.07.2009	18:20	3	40°10' – 40°25' с. ш.; 52°00' – 52°20' в. д.	40–70	1560; 1600; 1200	800; 800; 670	4; 5; 3
18.07.2009	07:03	1	40°26' с. ш.; 52°25' в. д.	40	1030	630	4
24.07.2009	18:23	3	39°42' – 41°13' с. ш.; 51°07' – 52°00' в. д.	60–150	6320; 720; 5000	900; 720; 2200	10; 2; 3;
25.07.2009	06:33	1	41°10' с. ш.; 51°43' в. д.	170	3600	3600	2
27.07.2009	18:29	1	40°08' с. ш.; 52°09' в. д.	50	1200	670	3
28.07.2009	06:39	1	39°50' с. ш.; 52°02' в. д.	70	4300	1200	9
31.07.2009	06:45	2	39°30' с. ш.; 52°05' в. д. 39°29' с. ш.; 52°20' в. д.	50–100	4050; 4725	750; 975	6; 9
06.08.2009	18:14	>6	40°13' – 43°15' с. ш.; 50°49' – 52°12' в. д.	30–150	различная	1200	различное
09.08.2009	18:20	8	39°31' – 44°09' с. ш.; 50°11' – 52°06' в. д.	40–100	различная	825	различное

Окончание табл. 5.3

Дата	Время (UTC)	Число пакетов на снимке	Местоположение пакетов	Глубина места, м	Ширина пакета, м	Максимальная длина волны, м	Число волн в пакете
12.08.2009	18:26	4	39°31' – 44°09' с. ш.; 50°11' – 52°06' в. д.	40–70	2775; 2550	750; 1100; 825	4; 5; 5; 3
15.08.2009	18:31	1	42°58' с. ш.; 50°52' в. д.	70	3900	675	6
16.08.2009	06:42	2	40°14' с. ш.; 52°25' в. д. 41°01' с. ш.; 52°27' в. д.	50	3525; 3375	825; 675	7; 6
25.08.2009	18:17	2	42°23' с. ш.; 52°10' в. д.; 43°18' с. ш.; 50°55' в. д.	200; 80	2770; 1350	450; 375	8; 5
28.08.2009	18:23	5	39°15' с. ш.; 51°51' в. д.; 43°23' с. ш.; 50°52' в. д.	100; 60	различная	450; 1125	различное
31.08.2009	06:36	1	41°59' с. ш.; 52°05' в. д.	60	2250	600	5

Достаточно часто фронты в цуге представляют собой концентрические дуги, что позволяет с определенной точностью выявить район генерации данного цуга. Обычно это неоднородности рельефа, банки, резкие поднятия дна, все это характерно именно для восточного склона Среднего Каспия. На рис. 5.13 (см. с. 262) представлен фрагмент цветосинтезированного изображения, полученного в результате композиции 3-го, 2-го и 1-го спектральных каналов ЕТМ+ Landsat-7. Съемка проводилась в области солнечного блика, и в отличие от РЛИ, на которых передний фронт проявляется в виде яркой светлой полосы, что соответствует усилению рассеяния радиолокационного сигнала и соответственно сулюю (Булатов и др., 2003а), на данном оптическом изображении ППВВ проявляются в виде темных полос. На приведенном фрагменте хорошо различаются несколько цугов, распространяющихся под углом друг к другу. Расстояние между цугами А и В, В и С составляет соответственно 14 и 13 км. Расчеты показывают, что цуги распространялись со скоростью примерно 50 см/с.

Близкие оценки скорости распространения цугов ВВ были получены и для случая, представленного на рис. 5.14а (см. с. 263). Приведенное на этом рисунке радиолокационное изображение получено с высоким пространственным разрешением (12,5 м в точке) на VV-поляризации излучения и приема. На увеличенном фрагменте (рис. 5.14б, см. с. 263) хорошо видно взаимодействие трех цугов солитонов.

Сезонная зависимость районов проявлений ВВ в Каспийском море

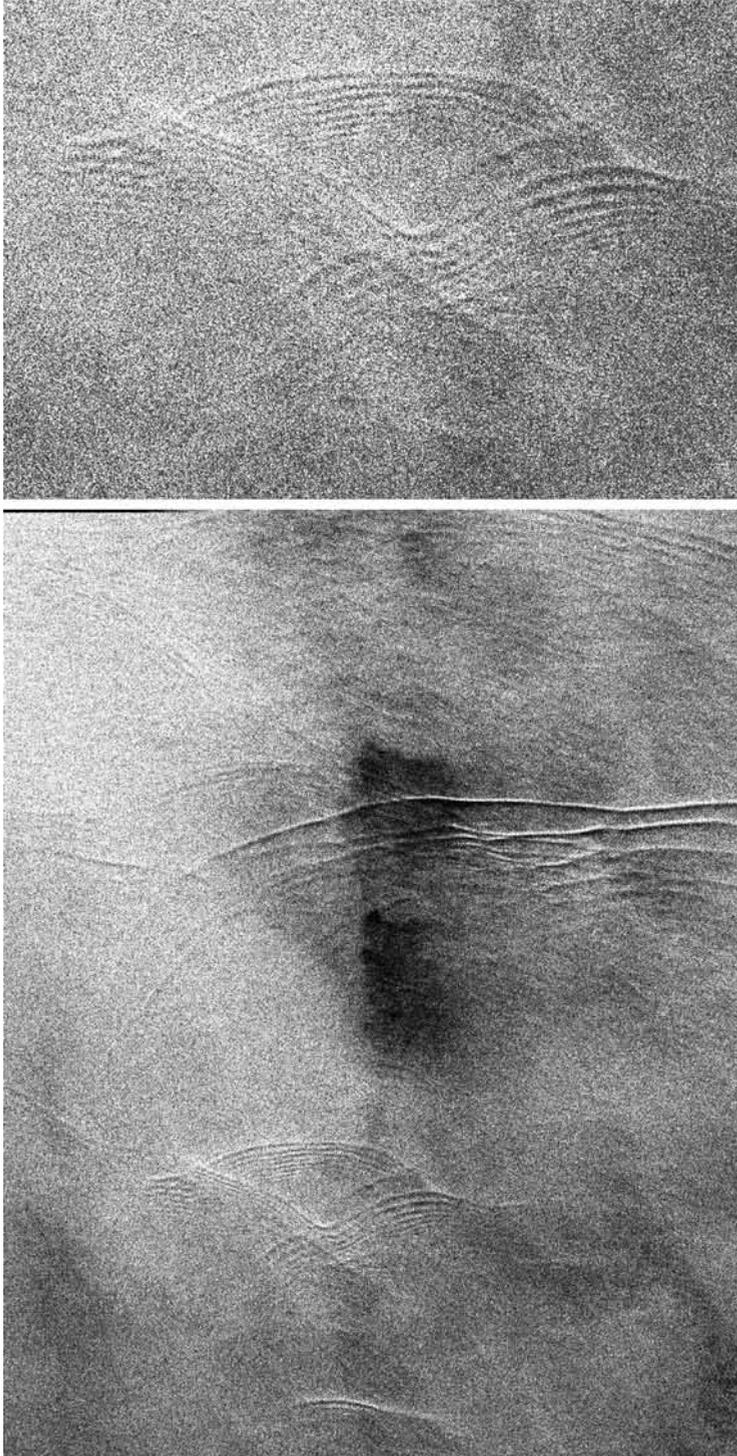
Проведенный в 2009 г. спутниковый мониторинг акватории Каспийского моря показал, что все многочисленные поверхностные проявления цугов ВВ зарегистрированы в период с третьей декады мая до конца августа. Первый случай ППВВ был



Рис. 5.13. Множественные проявления пакетов внутренних волн, распространяющихся в виде концентрических окружностей. Средняя длина волны — 750 м. Буквами отмечены цуги, для которых вычислялась скорость распространения цугов. Фрагмент цветосинтезированного ETM+ Landsat-7 изображения (42×35 км), полученного 31.05.2009 г. с разрешением 30 м. Композиция 3-го, 2-го и 1-го каналов

выявлен 21 мая в юго-западной части Каспия, вблизи м. Лимир; последний раз в сезоне ППВВ наблюдались 28 августа в районе Казахского залива. Прослеживается четкая сезонная зависимость локализации ВВ: если в мае — начале июня ВВ наблюдались в Южном Каспии, то, по мере прогрева воды в течение лета, места зарождения и распространения ВВ сдвигались на север. Большая часть ППВВ была выявлена в восточной части Каспийского моря севернее Апшеронского порога в районе 40° с. ш., 52° в. д. (см. табл. 5.3). На рис. 5.15 (см. с. 264) схематично представлены основные районы наблюдений ППВВ в разные периоды 2009 г.

Анализ архивных радиолокационных данных, полученных в 2003 и 2007 гг., и данных за май — начало июня 2010 г. показал, что поверхностные проявления ВВ наблюдались практически в тех же районах, что и в 2009 г.



Р и с . 5.14. Примеры поверхностных проявлений нелинейных взаимодействий цугов внутренних волн в Каспийском море: *а* — фрагмент изображения ASAR Envisat (50×37 км), полученного 22.08.2003 г. в 06:47 UTC с разрешением в точке 12,5 м; *б* — увеличенный фрагмент (15×16 км) данного РЛИ, демонстрирующий взаимодействие трех цугов солигонов

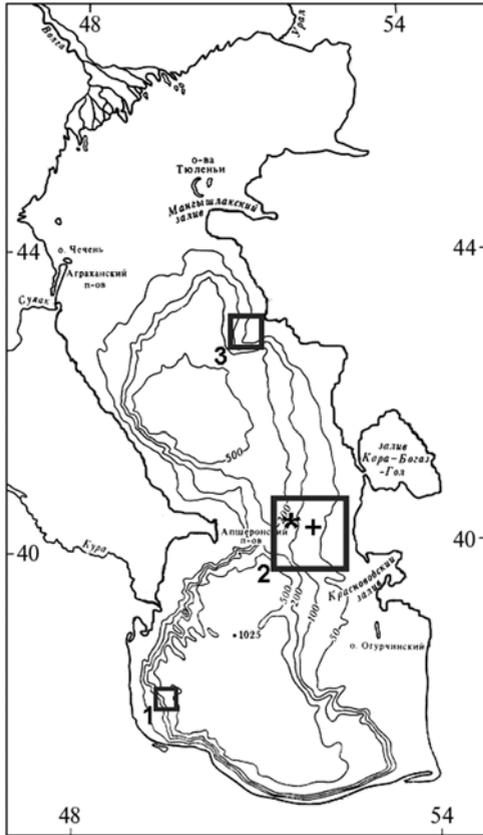


Рис. 5.15. Карта-схема Каспийского моря. Квадратами отмечены районы поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных на спутниковых изображениях в 2009 г.: 1 — в конце мая; 2 — в июне — начале августа; 3 — в августе. Крестиком отмечено положение гидрологической станции 1976 г., звездочкой — 1977 г.

Время массового проявления ВВ — июнь — первая половина июля — очевидно связано, на наш взгляд, с формированием сезонного термоклина. В Среднем и Южном Каспии в летний период величина солёности относительно постоянна по глубине, поэтому в первом приближении можно считать, что градиент плотности пропорционален только градиенту температуры. Со второй половины июля происходит сильный прогрев воды до больших глубин, скачок термоклина не ярко выражен и прижат ко дну. Как показали контактные измерения, проводившиеся в данном районе осенью 1972 и летом 1973 г., во второй половине лета и осенью ВВ либо совсем отсутствовали, либо имели сравнительно небольшую высоту (Ко-

няев, 1975). Соответственно нет и поверхностных проявлений, которые можно было бы обнаружить на спутниковых изображениях.

Внутренние волны на Каспии, выявленные в 2010 г., менее интенсивны, но география их наблюдения существенно шире. Если в 2009 г. все, кроме одного случая, ППВВ были выявлены у восточного берега Среднего Каспия, то в 2010 г. они встречались и в западной и центральной частях. Возможно, это связано с тем, что разные процессы явились причиной зарождения ВВ.

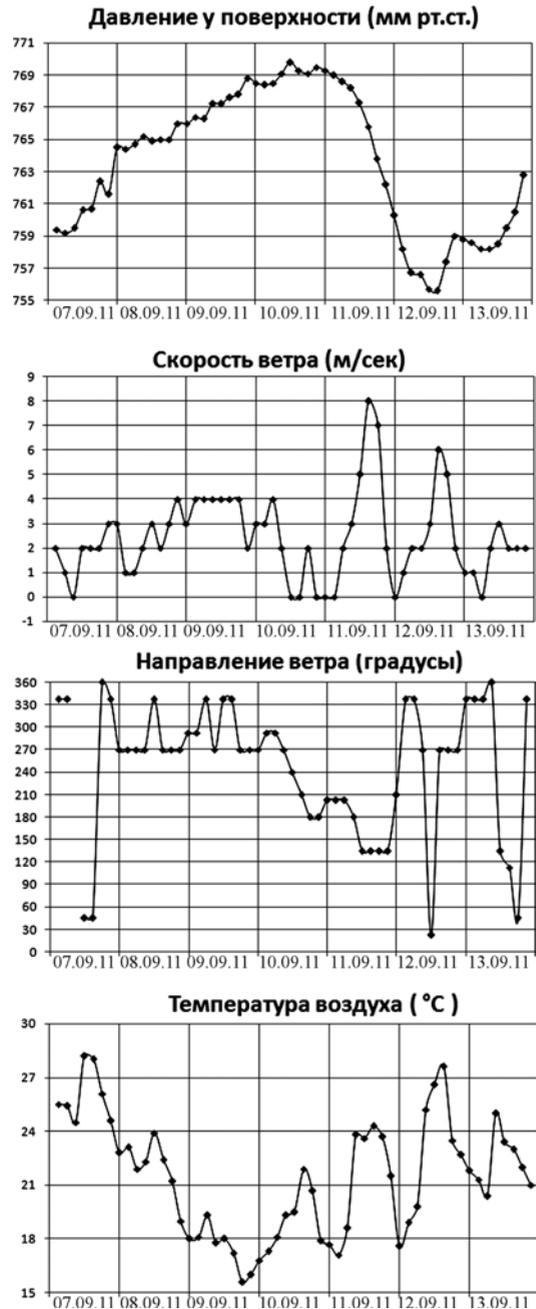
Энергетические источники ВВ в Мировом океане разнообразны. В частности, один из источников ВВ — динамические процессы в атмосфере, осуществляющие передачу энергии океану при изменениях атмосферного давления, касательных напряжений ветра и потока плавучести на его поверхности (Ле Блон, Майсек, 1981). Возможность генерации ВВ в результате прямых атмосферных воздействий изучалась как теоретически, так и в ходе натурных исследований (Леонов, Миропольский 1977, Иванов и др., 1985; Доценко, 1996). Перемещающиеся фронты и зоны атмосферных возмущений не являются квазистационарными. Показано, что при перемещении нестационарной аномалии атмосферного давления происходит возбуждение ВВ, не затухающих при удалении от зоны генерации (Доценко, Савоськин, 1993). Натурные исследования (Иванов и др., 1985) подтвердили, что короткопериодные ВВ могут также возбуждаться в короткий срок после резкого усиления ветра.

Рис. 5.16. Метеоусловия в районе проведения РЛ-съемки: *a* — давление у поверхности; *b* — скорость ветра у поверхности; *в* — направление приповерхностного ветра; *д* — температура воздуха

Внутренние волны, источником возбуждения которых является движущееся атмосферное возмущение, были выявлены при анализе съемок морской поверхности Западного Каспия, проведенных при помощи радиолокатора ASAR Envisat. Через район съемки 11 сентября 2010 г. проходил атмосферный фронт окклюзии, образовавшийся в тылу циклона, определявшего синоптические условия в этом районе в течение нескольких суток, предшествовавших съемке. Факт прохождения атмосферного фронта подтверждался данными об изменении атмосферного давления, поля приповерхностного ветра и температуры воздуха, измеренными ближайшей к месту получения спутниковых изображений метеостанцией Дербента (рис. 5.16). Метеорологические данные взяты на сайте «Расписание погоды» (<http://rp5.ua>).

Приведенные метеоданные наглядно выявляют изменения свойств воздушной массы и подтверждают фронтальный характер процесса. В частности, данные регистрации давления вблизи поверхности указывают на наличие ложбины, характерной для атмосферных фронтов. Падение давления сопровождалось поворотом ветра против часовой стрелки от северо-северо-западного до юго-восточного направления. Скорость ветра также существенно возросла.

На рис. 5.17*a* (см. с. 266) приведено ASAR Envisat изображение морской поверхности, полученное 11 сентября 2010 г. в 06:52 UTC с разрешением в точке 75 м. На нем отчетливо выделяются несколько групп структурных образований. Во-первых, это зона скачкообразного перепада яркости, обозначенная буквой А. Во-вторых, это



периодические структуры, состоящие из тонких протяженных полос, ориентированные вдоль линии скачка сигнала и находящиеся от нее на расстоянии 20–25 км, обозначенные буквой Б. На основании рассмотренных выше метеорологических данных можно сделать вывод, что скачкообразный перепад радиолокационного сигнала, обозначенный буквой А, является отражением наземной линии перемещающегося атмосферного фронта. Ориентированные вдоль наземной границы фронта структуры, обозначенные буквой Б, — поверхностное проявление пакета внутренних волн в море, зародившихся на склоне шельфа под воздействием активных динамических процессов в атмосфере, возможно, как отклик на импульсные возмущения ветра. Увеличенный фрагмент Envisat ASAR изображения, отображающий проявление внутренних волн в море, приведен на рис. 5.17б. Вариации сечения обратного рассеяния, обусловленные поверхностными проявлениями ВВ вдоль разреза ГД, приведены на

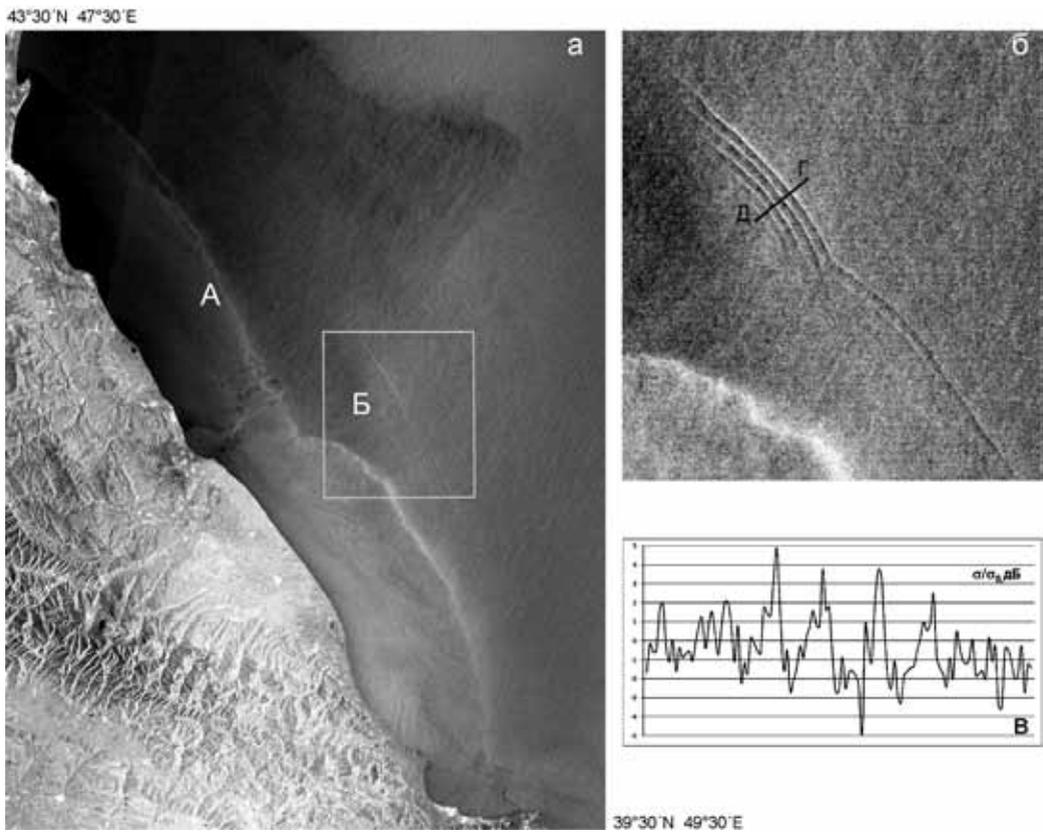


Рис. 5.17. Проявления цуга внутренних волн вблизи атмосферного фронта: *а* — изображение морской поверхности ASAR Envisat, полученное 11.09.2010 г. в 06:52 UTC с разрешением в точке 75 м. Буквой А отмечен скачкообразный перепад радиолокационного сигнала, являющийся отражением наземной линии перемещающегося атмосферного фронта. Цуг внутренних волн отмечен буквой Б; *б* — увеличенный фрагмент изображения Envisat ASAR, отображающий проявление внутренних волн в море; *в* — вариации радиолокационного сигнала, обусловленные поверхностными проявлениями ВВ, вдоль линии ГД

рис. 5.17в. Пакет ВВ отличался протяженностью фронта лидирующей волны, длина которого достигала 68 км, содержала 4 волны, максимальная длина волны в пакете составляла 1500 м.

Сейши — один из наиболее вероятных механизмов генерации внутренних волн в Каспийском море

Каспийское море — крупнейшее в мире замкнутое озеро-море. Оно, как и Черное море, может быть отнесено к бесприливным морям. На побережье высота прилива не превышает 12 см, в открытом море — 2 см. Как было отмечено выше, зарождение внутренних волн в морях со слабыми приливами возможно при протекании активных динамических процессов, связанных с возникновением и релаксацией прибрежного апвеллинга, вихрями различных масштабов, сгонно-нагонными явлениями, осцилляциями с инерционной частотой гидрологических фронтов, сейшами и внутренними борами. Летний апвеллинг имеет большое значение для Каспийского моря, в корне меняя динамические процессы на акватории (*Архипкин*, 1990). Он наблюдается ежегодно вдоль всего восточного побережья Среднего Каспия и частично проникает даже в Южный Каспий. Подъем холодных глубинных вод происходит с различной интенсивностью в результате воздействия преобладающих в летний сезон северо-западных ветров. Ветер этих румбов вызывает отток тёплых поверхностных вод от берега и подъем более холодных вод из промежуточных слоев. Как следствие, на поверхности воды наблюдается понижение температуры (7–15 °С). Горизонтальные перепады температуры достигают 2,3 °С на поверхности и 4,2 °С на глубине 20 м. Очаг апвеллинга постепенно смещается с 41–42° с. ш. в июне к 43–45° с. ш. в сентябре (*Архипкин*, 1990).

Анализ данных прибрежных метеостанций (Баку и Красноводска) и карт фактической погоды (<http://cliware.meteo.ru/meteo/>) показал, что в периоды, предшествовавшие проявлениям ВВ, не было условий для возникновения значительного апвеллинга, и на картах поверхностной температуры, построенных по данным MODIS Aqua/Terra и AVHRR NOAA (<http://smis.iki.rssi.ru/archive/>), он не наблюдался. Наиболее вероятным механизмом, ответственным за генерацию выявленных на спутниковых изображениях ВВ, на взгляд авторов, являются сейши.

Сейши — свободные стоячие волны, возникающие в водоемах под действием внешних сил, представляют собой характерный вид колебательных движений. В Каспийском море они образуются вследствие быстрых изменений атмосферного давления или ветра над различными участками поверхности водоема. Размах сейшевых колебаний по наблюдениям в Баку и Махачкале может достигать до 70 см. Изучение сейшевых колебаний в Каспийском море проводилось как путем статистического анализа наблюдений за уровнем моря в разных пунктах, так и теоретическим моделированием (*Блатов* и др., 1990). Сопоставление обоих методов позволило выделить ряд сходных, обоснованных результатов. Показано, что независимые сейшевые колебания возникают не только в Среднем и Южном Каспии, которые разделены подводным Апшеронским порогом, но и в крупных заливах. Выделены доминирующие периоды 8,5–8,7 и 4,2–4,6 ч, обусловленные наличием продольных сейш всего Каспийского моря (одно- и двухузловой соответственно). Узловая линия продольной одноузловой сейши глубоководного Каспия проходит примерно через Апшеронский порог. Можно предположить, что интенсивные сейшевые течения, натываясь на

крутой склон, генерируют распадающиеся на цуги солитонов колебания термоклина подобно тому, как это происходит под воздействием приливных течений над краем океанских шельфов.

Оценка возможности проявлений ВВ на морской поверхности

Поскольку контактных подспутниковых измерений с судна в 2009–2011 гг. не проводилось, то для оценки гидрологической обстановки использовались данные контактных измерений температуры, солёности, плотности морской воды, накопленные за многие десятилетия на кафедре океанологии МГУ им. М. В. Ломоносова, и любезно предоставленные нам для анализа доцентом кафедры В. С. Тужилкиным. Для определения более детальных характеристик выявленных ВВ в Каспийском море, из этого архива были выбраны данные двух станций. На первой — № 760722014 — проводились измерения 22.07.1976 г. в точке с координатами $40^{\circ} 10'$ с. ш. и $52^{\circ} 00'$ в. д., глубина места 57 м (на рис. 5.15 отмечена крестиком). На второй станции — № 770818 — проводились измерения 18.08.1977 г. в точке с координатами $40^{\circ} 16'$ с. ш. и $51^{\circ} 40'$ в. д., глубина места 112 м (на рис. 5.15 отмечена звездочкой). Эти станции расположены в районе, где наиболее часто выявлялись ППВВ. По данным этих гидрологических станций были рассчитаны профили частоты плавучести (рис. 5.18а), дисперсионные соотношения (рис. 5.18б), профили амплитуд вертикальной (рис. 5.18в) и горизонтальной (рис. 5.18г) орбитальных скоростей низкочастотных внутренних волн, которым должны соответствовать профили внутренних

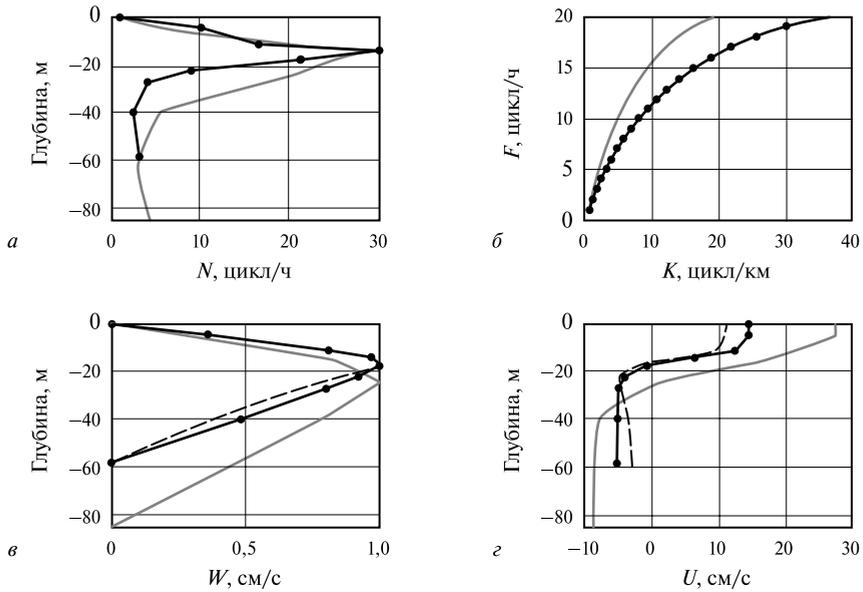


Рис. 5.18. Результаты расчёта параметров внутренних волн для плотностной стратификации в 1976 г. (линии с точками) и 1977 г. (сплошные линии): а — профили частоты плавучести; б — дисперсионные кривые ВВ низшей моды; в — сплошные кривые: профили амплитуд вертикальных скоростей для ВВ с частотой 0,12 цикл/ч; пунктир: то же для частоты 5 цикл/ч (максимальные скорости приняты равными 1 см/с); г — профили соответствующих горизонтальных скоростей

солитонов в приближении уравнения Кортевега де Вриза, а также фазовые скорости этих волн. Все оценки выполнялись в предположении, что генерация ВВ происходит под действием сейшевых колебаний с характерным для Среднего Каспия периодом 8,5–9 ч. Рассчитанная фазовая скорость низкочастотной (восьмичасовой) внутренней волны для более глубоководной станции (выполненная вблизи края шельфа в 1977 г.) и равная 0,69 м/с, оказалась заметно выше, чем скорость над мелководным участком в 1976 г. — 0,44 м/с. Полагая, что гидрологические условия в этой части Каспия в 1976 и 1977 гг. были примерно одинаковыми, можем считать, что средняя скорость движения низкочастотных внутренних волн на трассе должна быть около 0,5 м/с, что близко к оценке, полученной по космическим изображениям поверхностных проявлений пакетов коротких внутренних волн. Последние напоминают хорошо известные проявления внутренних солитонов на океанских шельфах (Бондур, 2004; Sabinin, Serebryany, 2005).

Амплитуды горизонтальных скоростей, показанных на рис. 5.18г, даны для случаев, когда максимальные вертикальные скорости условно принимаются равными 1 см/с.

Приведённые на рис. 5.18 результаты кинематических расчётов не позволяют судить о реальных значениях скоростей, но их можно приблизительно оценить исходя из следующих соображений. Во внутренних солитонах отношение горизонтальной орбитальной скорости U к фазовой C в верхнем слое составляет обычно несколько десятых долей (Sabinin, Serebryany, 2005). Отсюда, если $U/C = 0,2 - 0,3$, то в глубоководной части горизонтальные течения в солитонах должны достигать у поверхности $\sim 0,2$ м/с, а в более мелководной — $\sim 0,1$ м/с, что вполне достаточно для модуляции ветровой ряби, которая будет заметной из космоса (Бондур и др., 2010).

Можно получить представление и о горизонтальных течениях в коротких волнах, следующих за солитонами и хорошо заметных на снимках (см. рис. 5.13, 5.14) в виде квазипериодических структур, если задаться типичной высотой этих волн в 2–3 м (Иванов, Серебряный, 1985). Частота этих «хвостовых» волн со средней длиной около 300 м равна 5 ц/ч (см. рис. 5.18б), а профиль амплитуд вертикальных смещений в верхних слоях моря практически не отличается от профиля низкочастотных волн (рис. 5.18в) при чуть-чуть меньшей фазовой скорости $C = 42$ см/с. Из уравнения неразрывности следует, что горизонтальные орбитальные течения равны фазовой скорости, умноженной на вертикальный градиент амплитуды A колебаний водных слоёв: $U = C \cdot dA/dz$. Если эта амплитуда возрастает в верхнем слое от 0 до 2 м (на глубине 15 м), то $dA/dz = 0,133$ и $U = 6$ см/с, что также достаточно для того, чтобы и «хвосты» солитонов были заметны из космоса (Бондур и др., 2010).

ППВВ в Балтийском море (2009–2011)

Балтийское море представляет собой неглубокое шельфовое море, с преобладающими глубинами от 40 до 100 м. Колебания уровня, связанные с приливами, крайне невелики, их размер меняется от 4 см (Клайпеда) до 10 см (Финский залив). Поверхностные проявления внутренних волн в Балтийском море — достаточно редкое явление, и работы, посвященные их спутниковым наблюдениям, практически отсутствуют. В то же время контактные измерения ВВ в толще вод проводятся регулярно (Морозов и др., 2007). Как показывает опыт, наблюдение ППВВ средствами спутниковой радиолокации в акватории Балтийского моря представляется затруднительным.

Метеоусловия над Балтикой нестабильны. Усложнение гидрометеорологических условий — усиление или ослабление приводного ветра (штиль, ветровая тень), развитие волнения, цветение водорослей, выпадение интенсивных осадков, прохождение резких атмосферных и ветровых фронтов, появление внутренних волн в атмосфере — все это затрудняет распознавание ППВВ. Наблюдения показали, что радиолокационные образы атмосферных явлений в этом регионе занимают большую часть площади практически каждого РЛИ, а обусловленные ими вариации интенсивности радиолокационного сигнала достаточно высоки, что зачастую приводит к невозможности идентификации ППВВ (Митягина, Лаврова, 2010).

В 2009–2011 гг. выявлено 7 случаев проявления ВВ в собственно Балтийском море (включая Ботнический залив) и более 25 раз пакеты ВВ наблюдались в проливах Скагеррак и Каттегат. Все выявленные в Балтийском море ППВВ представляли собой одиночные пакеты, число волн в цуге, как правило, не превышало шести, максимальная длина волны не превышала 1 км, а длина фронта ведущей волны, как правило, была не больше 25 км. Все они наблюдались в июле-августе. Их характеристики представлены в табл. 5.4 (см. с. 271), а пример проявления на РЛИ отражен на рис. 5.19.

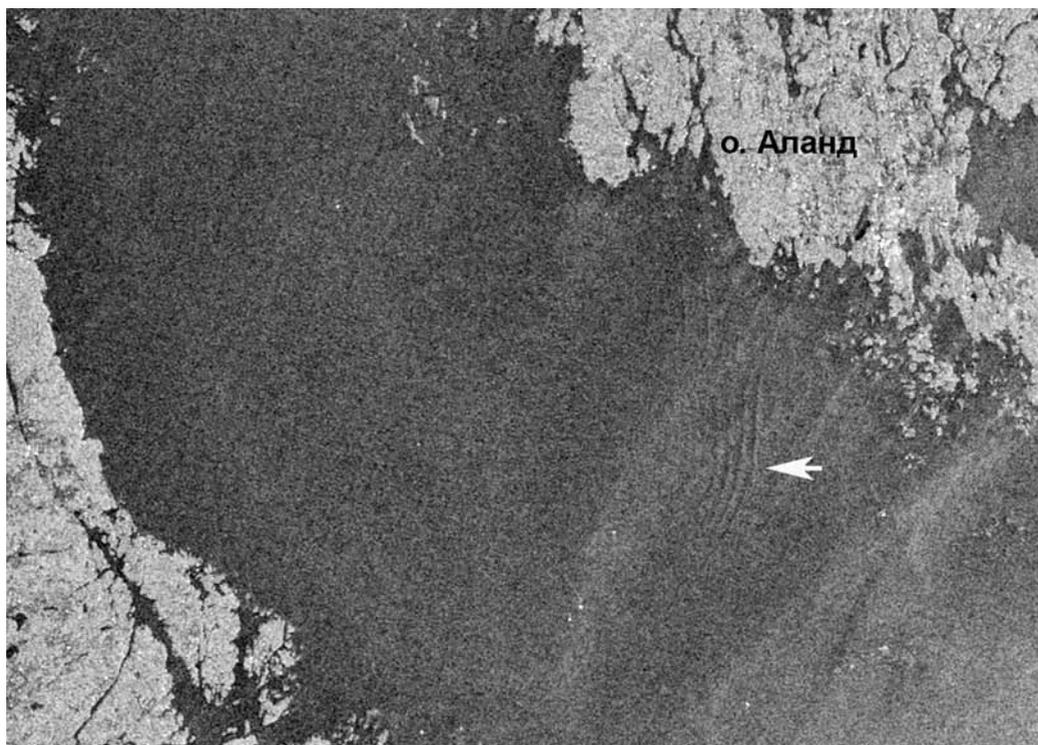


Рис. 5.19. Цуг внутренних волн в южной части Ботнического залива (отмечен стрелочкой). Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 24.07.2010 г. в 09:07 UTC с разрешением в точке 75 м

Таблица 5.4. Характеристики ППВВ, выявленных в Балтийском море в 2009–2011 гг. на РЛИ

Дата наблюдения	Время (UTC)	Местоположение пакета	Длина фронта ведущей волны, м	Максимальная длина волны, м	Количество волн в пакете
01.07.2009	19:48	60° 47' 34" с. ш. 18° 15' 26" в. д.	16 500	875	4
05.08.2009	08:05	54° 57' 57" с. ш. 15° 46' 58" в. д.	25 300	900	5
12.07.2010	20:13	60° 48' 10" с. ш. 18° 33' 50" в. д.	14 600	300	3
24.07.2010	09:07	59° 58' 53" с. ш. 19° 43' 00" в. д.	15 800	900	4
30.07.2010	09:20	62° 49' 00" с. ш. 20° 06' 11" в. д.	15 500	760	3

В Датских проливах, соединяющих Балтийское море с Северным морем, ВВ вызываются внутренними приливами, имеют вид классических солитонов и формируются на границе раздела вод с разной плотностью, которая связана не с формированием сезонного термоклина, как это происходит, например, в Каспийском море, а с галоклином, формирующимся за счет разности в солёности Балтийского и Северного морей. Этим объясняется тот факт, что ВВ в Датских проливах наблюдаются в любое время года. На рис. 5.20 представлен фрагмент РЛИ, полученного 25.03.2011 над акваторией пролива Скагеррак, на котором видны ППВВ взаимодействующих пакетов ВВ.

Таким образом, регулярный круглогодичный многосенсорный мониторинг позволил выявить и детально изучить внутренние волны в бесприливных морях, определить районы их наиболее частых поверхностных проявлений, высказать предположения об источниках их генерации.

Рис. 5.20. Пример взаимодействующих цугов внутренних волн в проливе Скагеррак. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 25.03.2011 г. в 09:42 UTC с разрешением в точке 75 м



Полученные результаты подтверждают, что спутниковое радиолокационное зондирование морской поверхности является действенным средством наблюдения и изучения внутренних волн в замкнутых бесприливных морях, существенным образом отличающихся по своим физико-географическим признакам, по структуре основных течений, по особенностям гидрологического режима и формирования пикноклина, по направлению главенствующих ветров и состоянию приводного слоя атмосферы. Дальнейшие наблюдения и обобщение полученных результатов позволят оценить относительный вклад различных механизмов генерации внутренних волн неприливного происхождения в интенсификацию поля внутренних волн.

5.3.2. Атмосферные гравитационные внутренние волны

Внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в стратифицированной атмосфере, встречаются часто и повсеместно. Они могут иметь различное происхождение. Среди причин, порождающих волновые возмущения в атмосфере, следует отметить обтекание воздушным потоком препятствий, в результате чего возникают так называемые подветренные внутренние волны; взаимодействие континентальных и морских воздушных масс; движение холодного атмосферного фронта. Внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в приводном слое атмосферы, далеко не всегда связаны с сопутствующей облачной системой и поэтому не всегда могут наблюдаться на оптических спутниковых изображениях. Радиолокационное зондирование океана открыло для наблюдения атмосферных гравитационных внутренних волн (АГВВ) новые возможности. На радиолокационных изображениях морской поверхности атмосферные волновые процессы проявляются в силу того, что связанные с ними вариации скорости и направления ветра модулируют шероховатость морской поверхности, а это, в свою очередь, проявляется в модуляции сечения обратного рассеяния (Булатов и др., 2003а)

Радиолокационные образы поверхностных проявлений атмосферных гравитационных внутренних волн и внутренних волн в океане зачастую обладают большим сходством. И те, и другие проявляются на РЛИ в виде квазипериодических полос повышенного и пониженного рассеяния, имеют практически одинаковую интенсивность модуляции обратного рассеянного сигнала. В тех районах Мирового океана, где океанические внутренние волны (ОВВ) генерируются внутренним приливом на краю шельфа, задача различения АГВВ и ОВВ на РЛИ упрощается. Как правило, в этом случае ОВВ имеют характерный вид цугов солитонов, которые чаще всего распространяются к берегу. Известны районы и сезоны их генерации (Jackson, Apel, 2002). ОВВ имеют высокие радиолокационные контрасты, светлые полосы (области повышенного рассеяния) имеют небольшую ширину, не больше 2–3 пикселей. АГВВ, как правило, распространяются либо от берега (орографические волны), либо наблюдаются за островами, либо связаны с прохождением атмосферного фронта. Пространственные масштабы АГВВ существенно больше: фронты достигают 200–300 км и более, длина волны редко бывает меньше 1–2 км. Однако в ходе проведения мониторинга было выявлено, что во внутренних морях, таких как Черное, Балтийское и Каспийское, поверхностные проявления АГВВ отличаются большим разнообразием: от гигантских одиночных узких цугов, длина фронтов которых простирается на 600 км (рис. 5.21а, см. с. 273), до мелкомасштабных цугов, с числом волн в цуге более 10

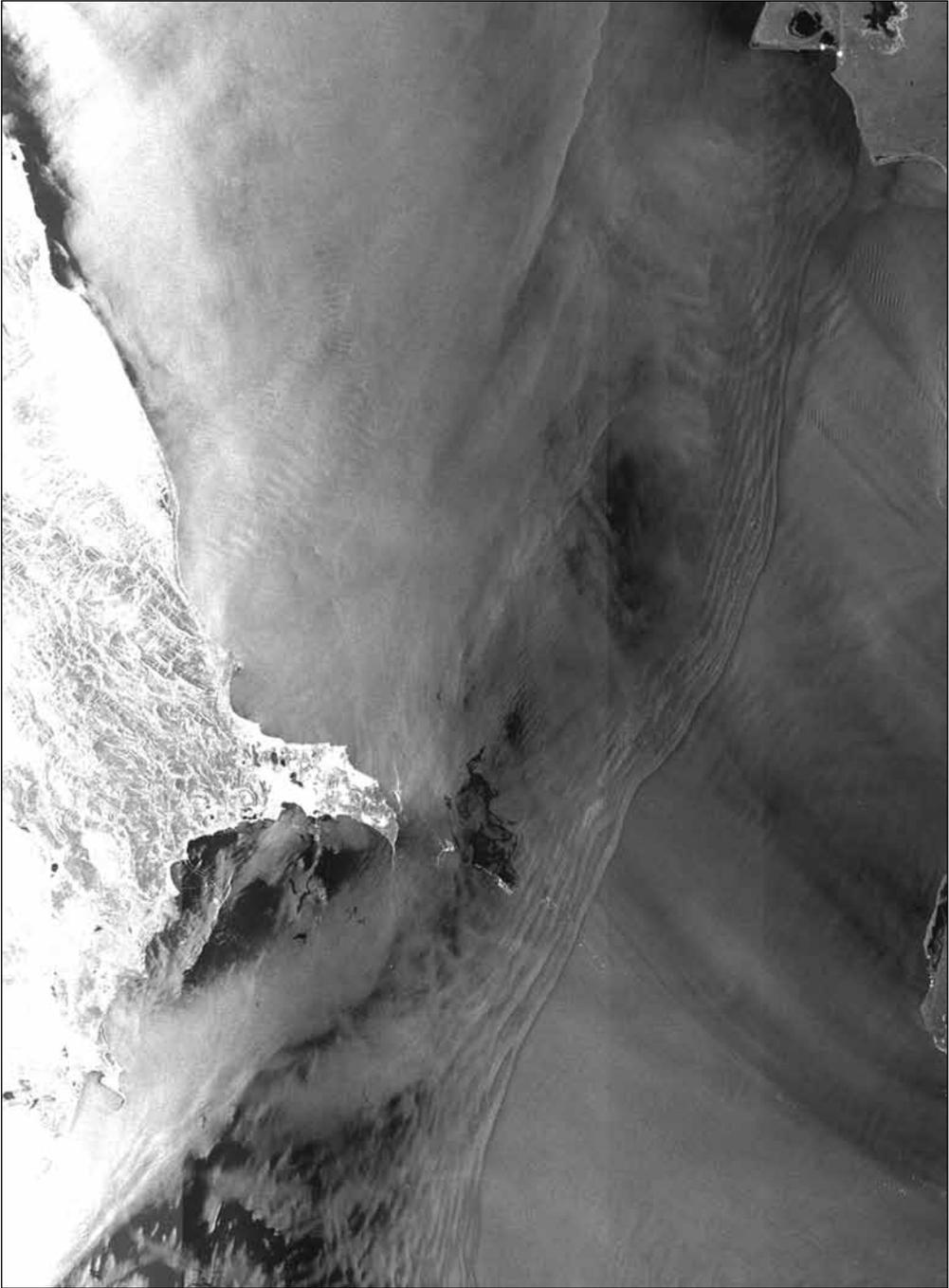
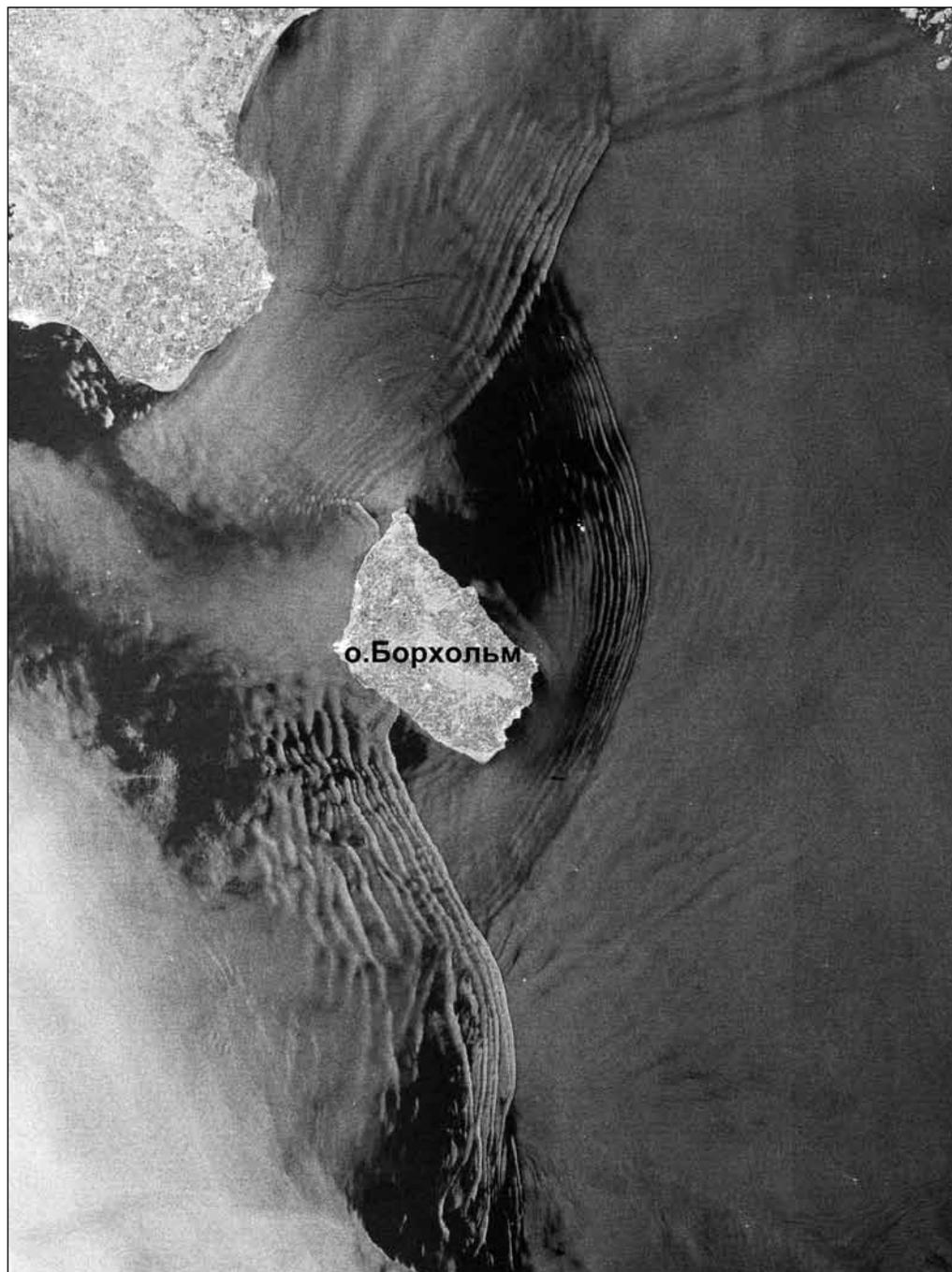


Рис. 5.21а. Поверхностные проявления атмосферных гравитационных внутренних волн: АГВВ в Каспийском море. Протяженность фронта лидирующей волны 600 км. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 09.03.2009 г. в 18:28 UTC с разрешением в точке 75 м



Р и с . 5.216. Поверхностные проявления пересекающихся атмосферных гравитационных внутренних волн в районе о-ва Борхольм. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 26.04.2010 г. в 20:33 UTC с разрешением в точке 75 м

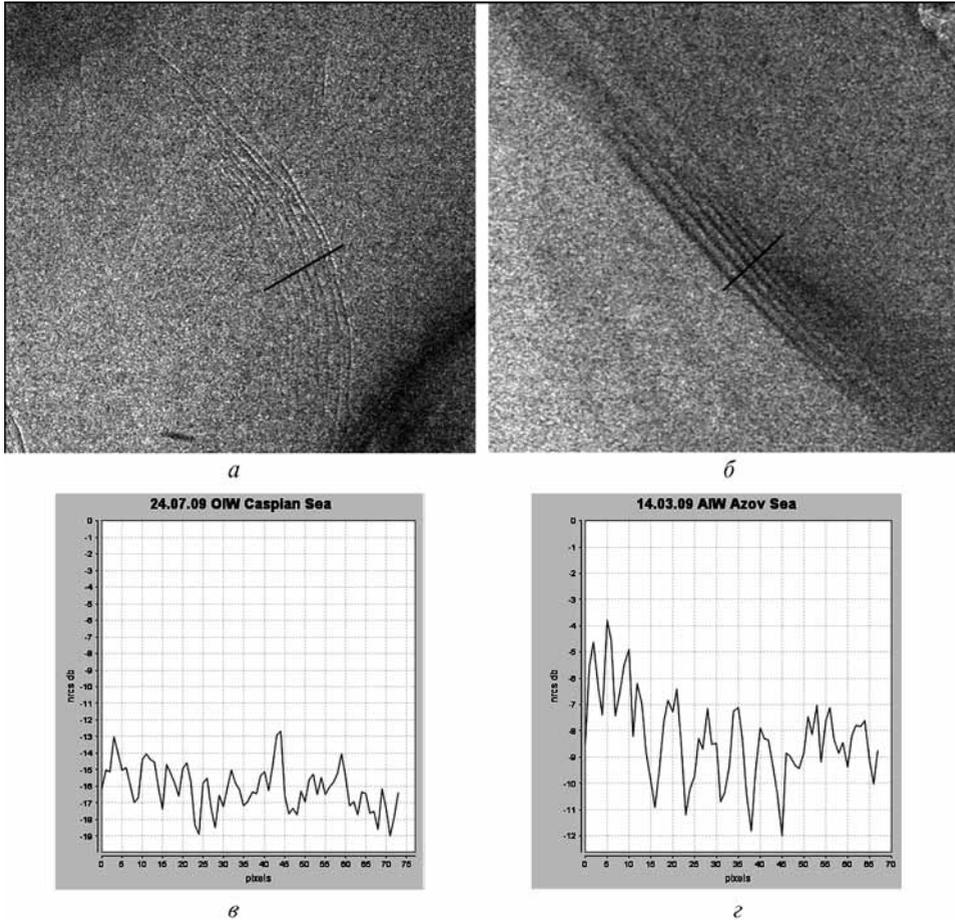


Рис. 5.22. Сравнение радиолокационных образов внутренних волн в море и в приземном слое атмосферы: *а* — цуг внутренних волн в Среднем Каспии, фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 24.07.2009 г. в 18:23 UTC с разрешением в точке 75 м; *б* — поверхностные проявления мелкомасштабных атмосферных гравитационных внутренних волн в восточной части Азовского моря, фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM VV, полученного 14.03.2009 г. в 19:11 UTC с разрешением в точке 75 м; *в* и *г* — вариации радиолокационного сигнала вдоль обозначенных на РЛИ линий разреза

(рис. 5.22б). Последние иногда бывает достаточно трудно отличить от поверхностных проявлений внутренних волн в море. В Балтийском море, где много островов, наблюдается особенно интересная картина: нередко случаи одновременного распространения под углом друг к другу нескольких цугов АГВВ (см. рис. 5.21б), что больше характерно для ОБВ. Таким образом, для бесприливных морей, в частности для Черного, Балтийского и Каспийского морей, где проводится спутниковый мониторинг, задача различения АГВВ и ОБВ сильно усложняется. Один из таких случаев представлен на рис. 5.22. Радиолокационные образы двух этих явлений очень похожи, хотя некоторые отличия видны на глаз: ОБВ проявляются в виде ярких светлых полос (сулов),

фронты которых искривлены, а АГВВ — в виде параллельных темных линий (сликов). Учитывая, что разрешение в точке обоих снимков одинаково (75 м), видно, что ширина каждой полосы сулоя меньше, чем полосы слика. Поверхностные проявления АГВВ как бы несколько сглажены. Это видно и на представленных графиках изменения радиолокационного сигнала вдоль разрезов, отмеченных на РЛИ черными линиями (рис. 5.22*в, г*, см. с. 275).

Естественно, помимо сравнения радиолокационных контрастов и пространственных характеристик, для обоснованного различения АГВВ и ОВВ в замкнутых морях без приливов необходим анализ всей совокупной гидрометеорологической информации и информации о состоянии морской поверхности, данных о рельефе дна и береговой орографии. Очень полезны данные радиозондов, но они обычно недоступны для большинства исследователей. В настоящее время, решающее значение имеет опыт эксперта, осуществляющего анализ РЛИ в комплексе со всеми доступными сопутствующими данными.

5.3.3. Вихри и вихревые диполи

Вихри и вихревые диполи являются одним из наиболее важных элементов прибрежной циркуляции вод. Несмотря на то, что исследованием вихревых процессов в Черном море занимаются много и довольно успешно, некоторые вопросы остаются нерешенными (Зацепин и др., 2002; Ginzburg et al., 2002; Гинзбург и др., 2008а; Костяной и др., 2010). В частности, это касается мелкомасштабных (с характерными размерами меньше внутреннего радиуса деформации Россби) или, как их еще называют, субмезомасштабных вихрей. Открытыми остаются вопросы, касающиеся механизмов их возникновения, районов проявления, продолжительности существования, а также их тонкой пространственной структуры и связи с мезомасштабными вихревыми структурами. Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды и в разных районах, по мнению авторов будет способствовать решению хотя бы части существующих проблем.

Проявление вихревых структур на спутниковых изображениях

Основными источниками информации о вихревой активности в районах мониторинга были радиолокационные изображения ASAR Envisat и SAR ERS-2. На РЛИ вихри и вихревые диполи визуализируются либо посредством пассивных трассеров, либо за счет изменения контрастов в конвергентно-дивергентных зонах. Пассивными трассерами служат в первую очередь пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые выглаживают морскую поверхность за счет подавления мелкомасштабной составляющей волнения (так называемый пленочный или сликовый механизм), и молодой подвижный лед. На долю вихрей, проявляющихся за счет пленочного механизма, приходится до 90 % всех выявленных вихрей. Пленки, вовлекаясь в орбитальные движения, достаточно детально «прорисовывают» вихри и вихревые диполи. Это дает возможность оценить их пространственные характеристики, определить знак их завихренности (циклонические — антициклонические). На РЛИ за счет «сликового» механизма хорошо проявляются вихревые структуры от нескольких сот метров до десятков километров. Наиболее часто вихри, «прорисованные» слика-

ми, выявляются на РЛИ в период активного цветения водорослей. Для морей — Черного, Балтийского и Каспийского — в разных их частях пик цветения приходится на разные периоды. Но чаще всего это происходит с апреля по сентябрь. Следует отметить, что, помимо необходимого условия — наличия большого количества ПАВ или скопления водорослей, для «проявляемости» вихрей на РЛИ существенна и скорость ветра. Лучше всего «сликовый» механизм работает при скоростях ветра 3–5 м/с, при которых уже существуют короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние радиолокационного сигнала, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки (*Dokken, Wahl, 1996*).

Проведенный мониторинг позволил выявить основные районы наиболее частых проявлений мелкомасштабных вихрей и вихревых диполей. Как правило, это прибрежная полоса и районы выноса рек, что связано с повышенной концентрацией

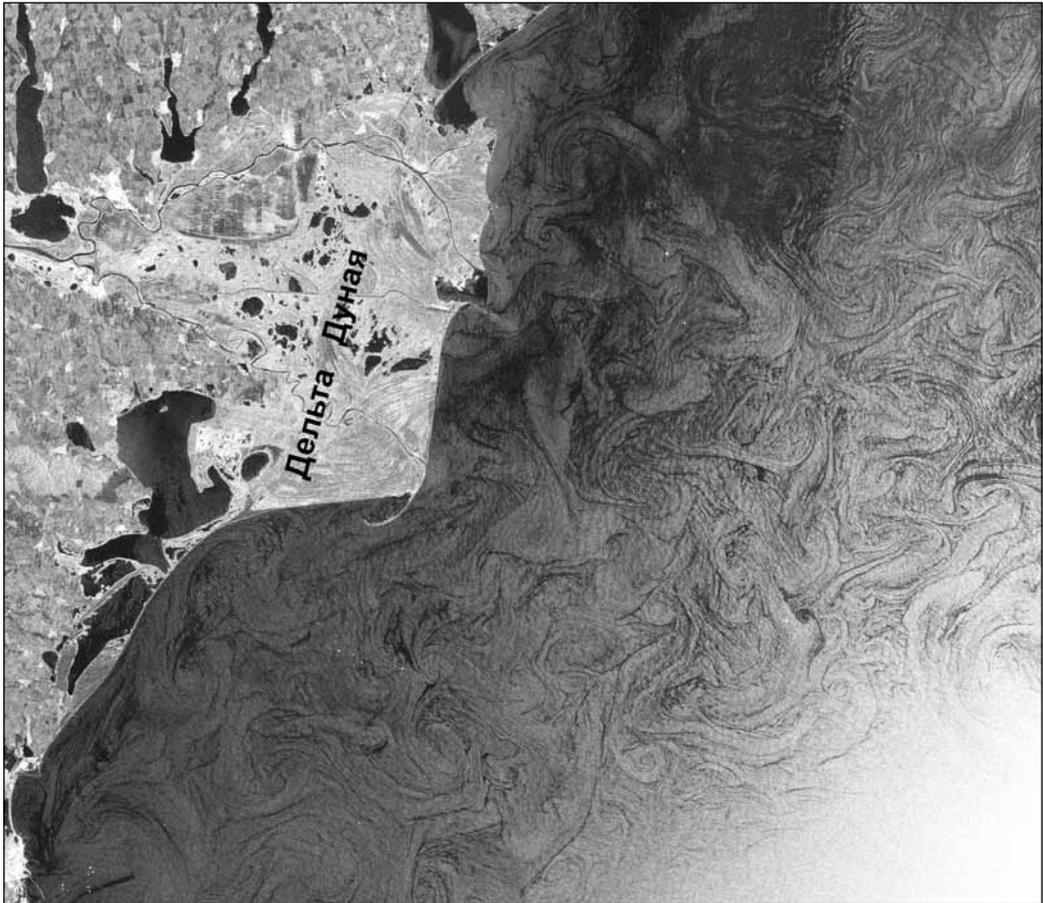


Рис. 5.23а. Проявление мелкомасштабных вихрей на РЛИ за счет «сликового» механизма: мелкомасштабные вихревые кластеры в Черном море в районе дельты Дуная. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM VV, полученного 29.08.09 в 08:14 UTC с разрешением в точке 75 м

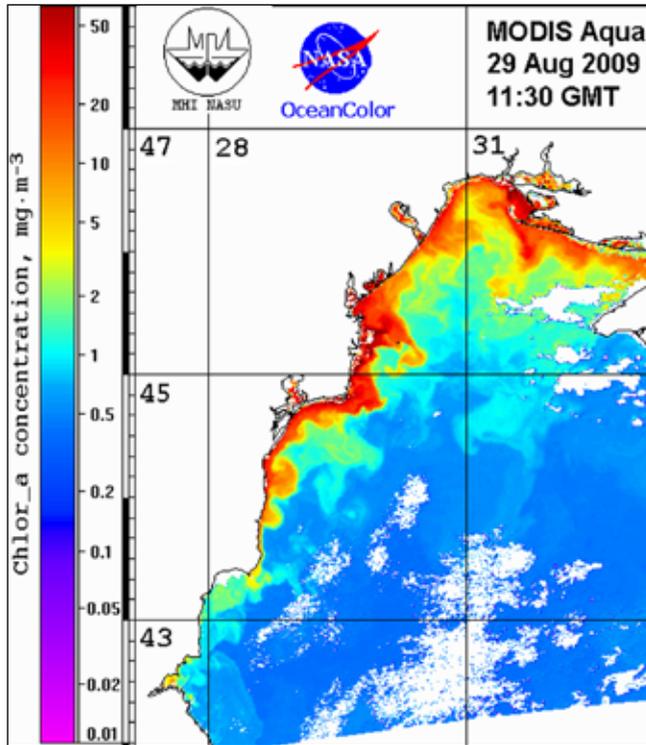


Рис. 5.23б. Поле концентрации хлорофилла-*a*, восстановленное по данным MODIS Aqua, полученным 29.08.2009 в 11:30 UTC с разрешением 1 км

поверхностно-активных веществ в воде. Во время активного цветения водорослей мелкомасштабные вихри и вихревые диполи за счет «сликового» механизма могут проявляться в самых разных частях. На рис. 5.23а (см. с. 277), 5.23в (см. с. 279), 5.23г (см. с. 280) представлены примеры проявлений на РЛИ мелкомасштабных вихрей за счет «сликового» механизма в Черном, Балтийском и Каспийском морях. Как видно из рисунков, радиолокационные образы мелкомасштабных вихрей во всех трех морях схожи и все они располагались в районах повышенной концентрации ПАВ, связанных с активным цветением водорослей. На рис. 5.23б приведена карта поля концентрации хлорофилла-*a* в районе дельты Дуная, восстановленного по данным MODIS Aqua. Мелкомасштабные вихревые структуры, которые проявляются на РЛИ (см. рис. 5.23а) наиболее многочисленны в области соответствующей повышенной концентрации хлорофилла-*a*.

Возникает вопрос: что «прорисовывают» слики? Означает ли это, что за счет сликов мы видим тонкую пространственную структуру вихрей, которые состоят из множества струй. Слики, как и в случае поверхностных проявлений внутренних волн, формируются в областях схождения течений (конвергентных зонах). Толщина сликовых полос примерно всегда одинакова и составляет 100–300 м, а расстояние между ними варьируется в зависимости от диаметра вихря. Для мелкомасштабных вихрей оно, как правило, не превосходит 1 км (рис. 5.24, см. с. 281).



Р и с . 5.23а. Проявление мелкомасштабных вихрей на РЛИ за счет «сликового» механизма: мелкомасштабные вихревые кластеры в Балтийском море северо-западнее о-ва Готланд. Фрагмент РЛИ SAR ERS-2, полученного 21.06.2009 в 09:47 UTC с разрешением в точке 75 м

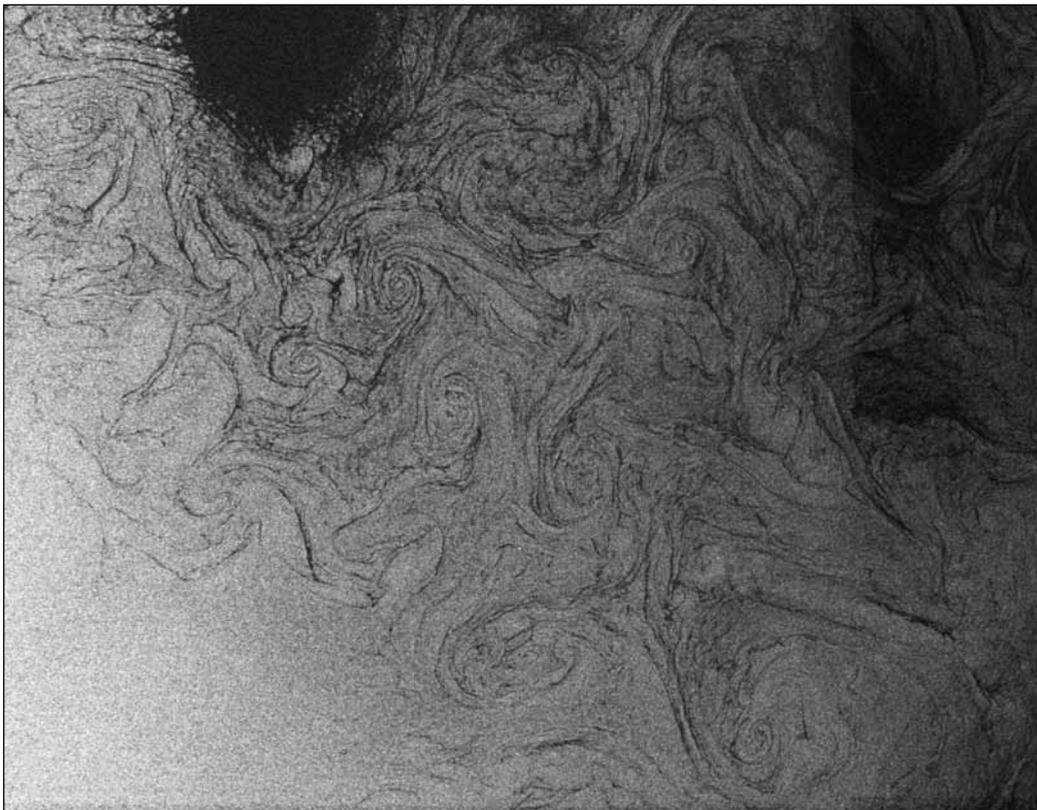


Рис. 5.23г. Проявление мелкомасштабных вихрей на РЛИ за счет «сликового» механизма: мелкомасштабные вихри в юго-восточной части Каспийского моря. Фрагмент РЛИ ASAR Evisat, полученного 19.10.2010 в 18:17 UTC с разрешением в точке 75 м

Какие процессы являются возбудителями мелкомасштабных вихрей? В отличие от прибрежных мезомасштабных антициклонических вихрей в Черном море, которые, как принято считать, возникают в результате меандрирования Основного черноморского течения (Титов, 2002), мелкомасштабные вихревые структуры представляют собой вихревые диполи и упаковки диполей или реже одиночные циклонические вихри. Трудно себе представить сдвиговые течения, которые порождали бы столь хаотичные структуры. Учитывая, что достаточно часто обширные области, занятые скоплением мелкомасштабных вихрей, располагаются вблизи границ атмосферных фронтов, можно предположить, что одним из механизмов возбуждения является прошедший атмосферный фронт, содержащий сильные ветровые неоднородности.

Другой механизм, благодаря которому вихри проявляются на РЛИ, связан с взаимодействием волн и течений в области циклонического сдвига течения (в дальнейшем для краткости сдвигово-волновой механизм) и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала (Johannessen et al., 1994). Как правило, это единственная возможность наблюдать вихри при сильных ветрах, когда пленки ПАВ разрушаются, или зимой при малой концентрации ПАВ.

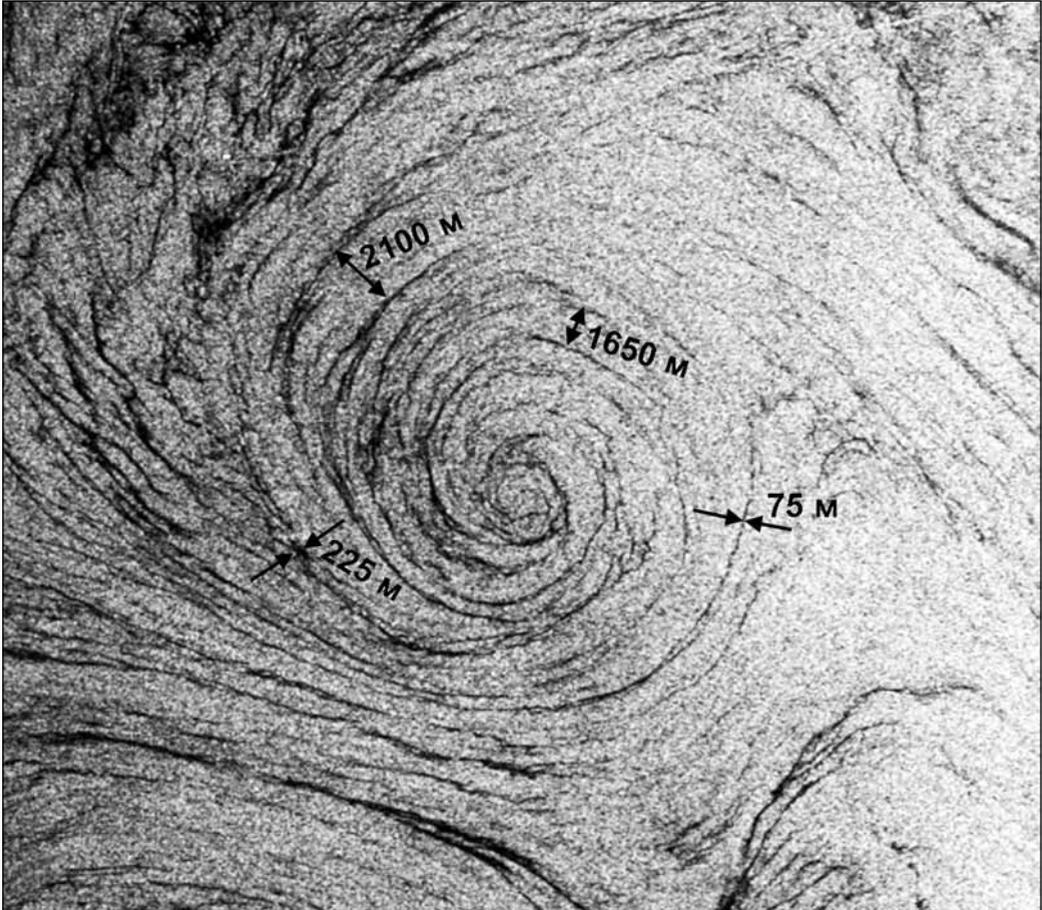
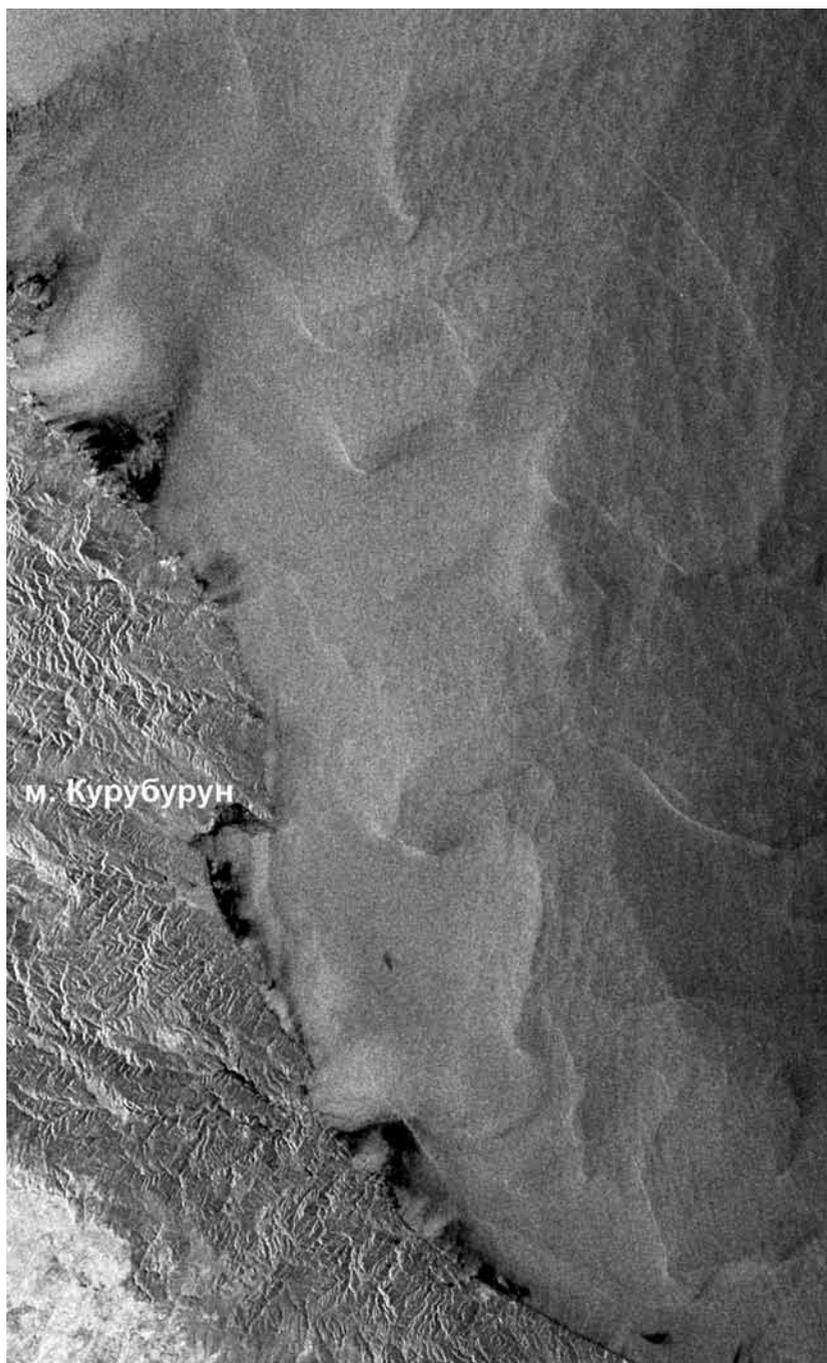


Рис. 5.24. Пространственные характеристики снимков, «прорисовывающих» циклонический вихрь. Фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 10.05.2007 г. в 07:37 UTC

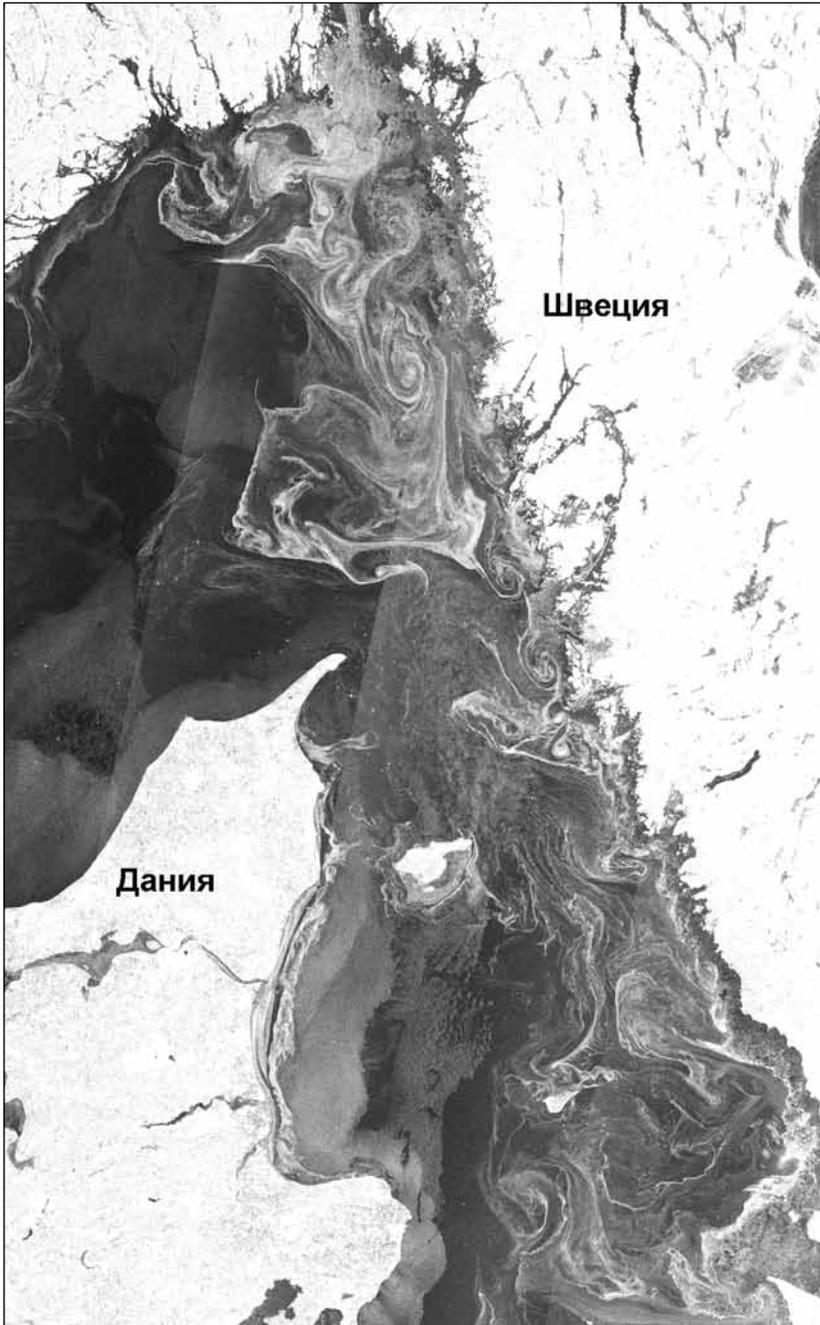
Такой механизм проявлений мелкомасштабных вихрей не дает возможность изучать их тонкую пространственную структуру, области повышенной яркости, связанные с дивергентными зонами, «прорисовывают» обычно только внешний контур вихря или вихревого диполя. На рис. 5.25а (см. с. 282) представлен пример вихрей, проявляющихся на РЛИ за счет этого механизма.

Еще один механизм визуализации вихревых структур на РЛИ за счет льда подобен проявлению вихрей на оптических изображениях. Он аналогичен пленочному механизму, только пассивными трассерами выступает молодой, еще не сплоченный, подвижный лед. На рис. 5.25б (см. с. 283) представлен пример «ледовых» вихрей в Датских проливах.

Спутниковые изображения в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах могут быть также успешно использованы для идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур (подробно данный вопрос рассмотрен в гл. 6).



Р и с . 5.25а. Проявление на РЛИ вихревых структур за счет «сдвигово-волнового» механизма. Фрагмент изображения ASAR Envisat IMM VV-поляризации западной части Черного моря, полученного 21.12.2010 г. в 19:48 UTC (© ESA)



Р и с . 5.25б. Проявление на РЛИ вихревых структур за счет «ледового» механизма. Фрагмент изображения ASAR Envisat WSM HH-поляризации над акваторией Датских проливов, полученного 26.01.2010 г. в 09:36 UTC. Представленные на рисунке РЛИ имеют разрешение в точке 75 м (© ESA)



Р и с . 5.26. Пример проявления мелкомасштабных вихрей на оптическом снимке в зоне солнечного блика. Фрагмент цветосинтезированного изображения ТМ Landsat-5, полученного 02.06.2010 г. с разрешением 30 м. Композиция 3-го, 2-го и 1-го каналов

Восстановленные по ИК-данным карты температуры поверхности моря (ТПМ) для различных сезонов показывают наличие в структуре ТПМ фронтальных зон, формируемых поле поверхностных течений. Типичные контрасты в таких фронтальных зонах составляют 0,2–1 °С, что способствует уверенному отображению мезомасштабных структур на картах ТПМ.

Сигнал, регистрируемый датчиками в видимом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отражением солнечного излучения от морской поверхности, в наибольшей степени проявляющемся в зоне солнечного блика. Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений, и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Таким образом, анализ оптических снимков позволяет выделить основные гидродинамические структуры, определяющие мезомасштабную изменчивость поля течений в изучаемом районе. Использование последовательных изображений для одной и той же акватории дает возможность получать уникальную информацию о поле поверхностных течений с точностью, недоступимой для современных гидродинамических моделей (см. гл. 3).

При определенных обстоятельствах вихри и вихревые диполи могут быть непосредственно зарегистрированы на снимках оптического диапазона в зоне солнечного блика. В этом случае сигнал формируется неоднородностями морской поверхности, например, пленками поверхностно активных веществ, которые выступают в качестве трассеров подобно тому, как это происходит на РЛИ (рис. 5.26, см. с. 284).

С целью более детального изучения вихревых структур, данные спутниковой радиолокации анализировались совместно с данными, полученными в видимом и ИК-диапазонах.

Пространственные и временные характеристики мелкомасштабных вихревых структур, выявленных на радиолокационных изображениях

При анализе РЛИ за 2009–2011 гг. в акваториях исследуемых морей было обнаружено значительное количество проявлений субмезомасштабных вихревых структур. Для определения частоты встречаемости вихрей на РЛИ была определена доля снимков, содержащих радиолокационные образы вихревых структур в общем числе проанализированных данных. В среднем около 30 % всех имеющихся изображений содержало какие-либо проявления вихревых структур. Для Черного, Балтийского и Каспийского морей были получены значения 34,5; 28,6 и 27,5 % соответственно. При анализе сезонной изменчивости этого параметра выявлено, что в весенний и летний периоды доля РЛИ с обнаруженными вихрями достигала 37 %, в осенний — 26 %, в зимний — 20 %.

Всего за период 2009–2010 гг. (данные за 2011 г. находятся в обработке) было обнаружено около 14 тыс. вихревых структур. Практически все они (около 98 %) обладали циклонической завихренностью. Наибольшее количество вихрей обнаружено в Балтийском море — 6234, — в Черном — 4778 и менее всего — в Каспийском — 2942. Сравнение количества обнаруженных в отдельных морях вихрей с количеством РЛИ, полученных для данных акваторий, показало, что в целом распределение количества вихрей по морям пропорционально количеству полученных для данного моря изображений.

Непосредственный анализ имеющегося массива радиолокационных данных показал, что в среднем 79 % обнаруженных проявлений вихревых структур были визуализированы с помощью «сликового» механизма (первый тип), а оставшийся 21 % — с помощью «сдвигово-волнового» (второй тип). При рассмотрении соотношения между вихрями первого и второго типа в отдельных бассейнах было выявлено, что наибольшая доля вихрей второго типа наблюдалась в Черном море — 28,5 %, в Балтийском — 18,1 % и наименьшая — в Каспийском — 14,6 %.

В Балтийском море некоторый вклад в визуализацию вихрей внес ледовый механизм. С его помощью проявились около 4 % вихревых структур, обнаруженных в этом бассейне. Несмотря на образование обширного ледяного покрова в Северном Каспии, так называемые «ледовые» вихри в этом бассейне детектированы практически не были.

Как и следовало ожидать, в силу физической природы визуализации вихревых структур на РЛИ, наблюдается сезонная изменчивость в их проявлении за счет разных механизмов визуализации. В Балтийском и Черном морях в весенне-летнее время доля вихрей, проявляющихся за счет «сдвигово-волнового» механизма, как правило, уменьшается, в осенне-зимнее — увеличивается. Для Каспийского моря проследить сезонную зависимость в 2009–2011 гг. не представлялось возможным, так как в зимнее время Европейское космическое агентство осуществляло радиолокационную съемку практически только над акваторией Северного Каспия, где в это время наблюдался ледяной покров. Поэтому максимальное количество вихревых структур наблюдалось в Каспийском море в летнее время.

Сезонный ход в проявлении вихревых структур связан, прежде всего, с сезонной изменчивостью интенсивности напряжения ветра. В холодное время года отмечаются более высокие скорости приповерхностного ветра, что способствует проявлению вихревых структур за счет «сдвигово-волнового» механизма. В то же время более слабые ветра, наблюдаемые в теплое время года, благоприятствуют проявлению «сликового» механизма. Дополнительный вклад в сезонную изменчивость вихрей, проявляющихся за счет «сликового» механизма, может объясняться изменчивостью количества пленок на поверхности воды в результате сезонного хода жизнедеятельности фитопланктона.

Для 8250 наиболее хорошо выраженных вихревых структур был определен их пространственный масштаб. В качестве такового выбирался либо диаметр, либо — в случае с эллиптическими вихрями — длина большей оси эллипса.

В целом диаметр обнаруженных вихрей варьировался в достаточно широких пределах — от 1 до 80 км. В то же время размер 95 % всех вихрей находился в пределах 1–16 км, а 85 % вихрей — в пределах 2–12 км. Характерный размер вихрей составлял 4,5 км.

Для отдельных бассейнов были получены значения характерного размера: 6,5; 3,5 и 5,5 км соответственно для Черного, Балтийского и Каспийского морей. Можно заметить, они оказались строго пропорциональны значениям бароклинного радиуса Россби для этих районов (*Костяной* и др., 2010а).

Для исследования особенностей пространственного распределения вихревых структур все обнаруженные вихри были нанесены на обобщенные схемы. При анализе полученных схем был выявлен ряд закономерностей.

Черное море. Мелкомасштабные вихри, проявляющихся за счет «сликового» механизма и связанные с цветением фитопланктона, наблюдались в 2009–2011 гг. в ве-

сенне-летний период повсеместно. К областям повышенной концентрации можно отнести северо-западный и западный шельф и акваторию вдоль Анатолийского побережья. В зимнее время такие вихри наблюдались отдельными группами в центральных районах моря. Вихри, проявляющиеся за счет «сдвигово-волнового» механизма в весенне-летний период, были преимущественно сконцентрированы в достаточно узкой полосе вдоль западного побережья. Зимой они наблюдались в различных районах моря – как в прибрежной зоне, так и в открытом море. Осенью они были детектированы так же преимущественно вдоль западного побережья моря, но наблюдались и в центральной части западного суббассейна и у кавказского побережья.

Балтийское море. В целом обнаруженные вихри были распределены по акватории моря равномерно. При анализе пространственного распределения вихрей в отдельные сезоны можно выделить несколько их особенностей. В зимний сезон вихри проявлялись на РЛИ в основном за счет «сдвигово-волнового» механизма и были детектированы в отдельных районах собственно Балтийского моря. Самая обширная область их концентрации была расположена к северу от о-ва Готланд и от устья Финского залива до западного берега моря. Далее следуют три менее обширные области: к югу от о-ва Эланд, в Арконском море и в Гданьском заливе. В весенний и летний периоды, как отмечалось выше, вихри проявлялись за счет «сликового» механизма и распределились по акватории достаточно равномерно. Осенью они были сконцентрированы в отдельных кластерах. Самый обширный наблюдался вокруг о-ва Готланд, далее следуют центральная часть Ботнического моря, затем область к юго-востоку от о-ва Борнхольм, центральная часть Ботнического залива и Рижский залив.

Каспийское море. В акватории Каспийского моря все наблюдаемые вихри были сконцентрированы в центральной и южной части моря, а в северной части, как правило, преобладали неблагоприятные для их проявления условия – ледяной покров и/или сильный ветер.

В весенний период повышенная концентрация мелкомасштабных вихрей наблюдалась вдоль западного побережья Центрального Каспия, а также по линии от южного побережья Апшеронского п-ова к входу в зал. Кара-Богаз-Гол. Летом мелкомасштабные вихри были распределены достаточно равномерно по всей акватории Среднего Каспия с некоторым уменьшением концентрации вдоль центральной оси бассейна. Осенью они были сосредоточены в трех обширных районах: к юго-западу от Красноводского п-ова, у Казахского залива и у западного побережья у Махачкалы.

Таким образом, можно заключить, что мелкомасштабные вихри могут образовываться повсеместно в рассматриваемых морях и их проявление на РЛИ определяется следующими условиями: наличием трассеров – поверхностных пленок – и умеренных скоростей ветра. В то же время преимущественно в зимний период вихри наблюдаются, как правило, в районах с наибольшими скоростями ветра и, следовательно, дрейфовых течений, т. е. преимущественно у западных побережий рассматриваемых бассейнов.

Особенности проявления вихревых структур в периоды цветения фитопланктона и цианобактерий в Балтийском море

Совместный анализ спутниковых радиолокационных изображений и данных, полученных в видимом и ИК-диапазонах, позволяет более детально изучить вихревые структуры. Рассмотрим пример проявления вихрей в период активного цветения

в Балтийском море, когда изображения оптического диапазона становятся особенно информативными в плане отображения ими динамических структур. Как известно, функционирование экосистемы Балтийского моря характеризуется двумя основными пиками цветения фитопланктона: весенним цветением диатомовых водорослей и динофлагеллят, и летним цветением цианобактерий (HELCOM Eutrophication..., 2009).

Цветение диатомовых. В отличие от летнего цветения, весеннее цветение обусловлено нетоксичными холододлюбивыми диатомовыми водорослями и динофлагеллятами. Эти планктонные организмы распространяются по акватории Балтийского моря в период половодья, когда в море поступает большое количество холодных речных вод.

Чтобы выяснить особенности проявления гидродинамических структур на спутниковых изображениях во время цветения диатомовых, были проанализированы изображения ASAR и MERIS Envisat за апрель 2009 г.

Фрагмент РЛИ, полученного 25.04.2009 г. над юго-восточной частью Балтийского моря, представлен на рис. 5.27а. Многочисленные мелкомасштабные закручивающиеся сликовые структуры с характерным диаметром около 5 км детектируются в северо-восточной части изображения, а более крупные — в его центре. На изображении MERIS Envisat, полученном за сутки до радиолокационной съемки (рис. 5.27б), из всех гидродинамических структур проявились лишь две цепочки циклонических вихрей. Одна — из более крупных вихрей — наблюдается в центральной части изображения. Данная структура частично нашла отражение и на РЛИ. Другая цепочка — из

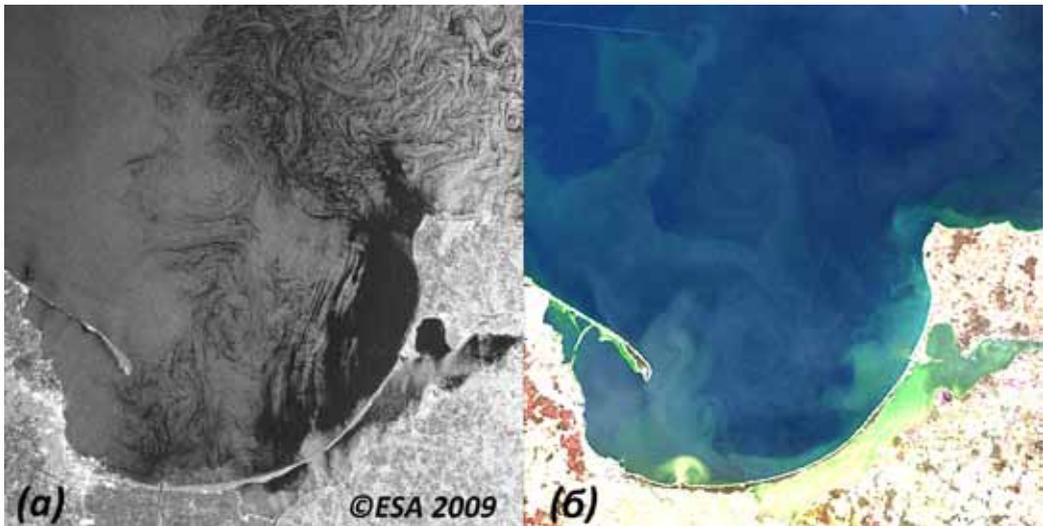


Рис. 5.27. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: а — изображение ASAR Envisat, полученное 25.04.2009 г. в 09:09 UTC; б — синтезированное в естественных цветах изображение MERIS Envisat (каналы 7-й, 5-й и 2-2), полученное 24.04.2009 г. в 09:42 UTC

сравнительно более мелких вихрей — протянулась от устья р. Висла к Хельской косе. На РЛИ она выражена менее четко. В центральной части Гданьского залива на обоих изображениях проявился антициклонический вихрь. Следует отметить, что, поскольку оптическое изображение MERIS Envisat получено не в зоне солнечного блика, на нем не нашли отражение мелкомасштабные вихревые структуры в виде отдельных вихрей, хорошо различимые в правом верхнем углу РЛИ. Они проявляются на оптическом снимке лишь в увеличении мутности. Можно сделать вывод, что во время весеннего цветения диатомовых в приповерхностном слое морских вод присутствует недостаточное количество клеток, которые могли бы быть хорошими трассерами для того, чтобы отобразить тонкую структуру вихревых процессов.

Цветение цианобактерий. Цианобактерии — группа прокариотных фототрофных организмов, за способность к фотосинтезу в прошлом ошибочно называемых также сине-зелеными водорослями. Массовое развитие цианобактерий наблюдается в теплые периоды, когда формируется устойчивая термическая стратификация вод и происходит обеднение поверхностных вод неорганическими соединениями азота. В периоды с длительной безветренной и солнечной погодой цианобактерии объединяются в агрегаты, которые всплывают к поверхности, образуя поверхностные или подповерхностные скопления. Под воздействием ветра и течений эти скопления переносятся как пассивные трассеры, прорисовывая, таким образом, поверхностные течения (*Siegel, Gerth, 2008*).

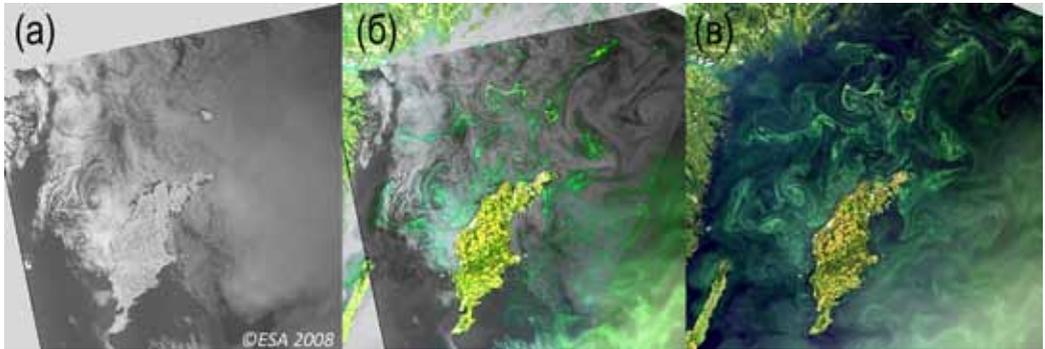
Принимая во внимание факт близповерхностного расположения агрегатов цианобактерий, можно было ожидать, что визуализированные ими вихревые структуры должны совпадать с вихрями, проявленными на РЛИ. С целью проверки этой гипотезы было проведено сопоставление полученных квазисинхронно изображений ASAR и MERIS Envisat, а также Landsat ETM+ за июль 2008 г., т. е. в период максимального развития цианобактерий (*Lavrova et al., 2010a; Каримова и др., 2011*).

Сопоставление было проведено для четырех случаев. Результаты одного из них продемонстрированы на рис. 5.28 (см. с. 290). Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 23.07.2008 г. с пространственным разрешением 150 м, представлен на рис. 5.28а. Спиральные вихревые структуры отчетливо проявились к северо-западу от о-ва Готланд.

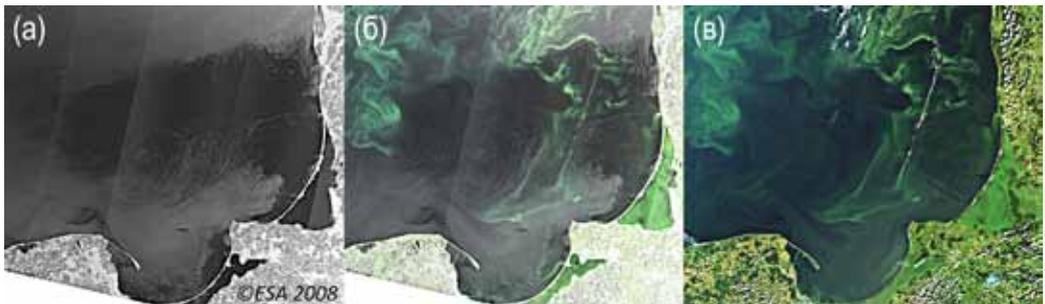
В акватории к востоку от о-ва Готланд господствовали сильные ветра, а к юго-западу от него, напротив, отмечались штилевые условия. И то, и другое воспрепятствовало проявлению вихрей в этих районах. Синтезированное в естественных цветах (композит 7-го, 5-го и 2-го спектральных каналов) изображение MERIS Envisat для той же акватории, полученное примерно через 13,5 ч после РЛИ, представлено на рис. 5.28б. В отличие от РЛИ, наличие трассеров (агрегатов цианобактерий) позволило проявиться вихреподобным структурам на всем рассматриваемом участке изображения. На рис. 5.28б показан тот же фрагмент РЛИ с наложением на него наиболее ярких пикселей изображения MERIS, которые соответствуют положению вихревых структур на этом изображении. Можно заметить, что положения вихревых структур и на том, и на другом снимках находятся в очень хорошем соответствии.

Рассмотрение аналогичного случая для изображений ASAR и MERIS Envisat, полученных с суточным интервалом 01.08.2008 г. и 31.07.2008 г. (рис. 5.29), дает те же результаты.

В период летнего цветения 2009 г. было произведено сопоставление изображений ASAR Envisat и ETM+ Landsat-7, полученных 17.07.2009 г. для юго-восточной части Балтийского моря (рис. 5.30, см. с. 291). В этом случае можно заметить некоторые отличия в проявлении вихревых структур на том и другом изображениях. Прежде всего следует отметить, что вихревые структуры в западной части Гданьского залива лучше проявились на РЛИ (рис. 5.30а), чем на радиометрическом изображении (рис. 5.30б), в то время как к северу от Гданьского залива ситуация противоположная (вследствие вариаций скорости приповерхностного ветра в момент радиолокационной съемки). Примечательно, что на РЛИ отчетливо проявился спиралевидный вихрь к северо-востоку от м. Таран, а на изображении ETM+ выражена только огибающая этого вихря. Это может послужить косвенным свидетельством того, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.



Р и с . 5.28. Проявление вихревых структур в районе о-ва Готланд: *а* — изображение ASAR Envisat, полученное 23.07.2008 г. в 20:11 UTC; *б* — РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующими положению вихревых структур; *в* — изображение MERIS Envisat, полученное 24.07.2008 г. в 09:53 UTC



Р и с . 5.29. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *а* — изображение ASAR Envisat, полученное 01.08.2008 г. в 09:03 UTC; *б* — РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующими положению вихревых структур; *в* — изображение Envisat MERIS, полученное 31.07.2008 г. в 09:34 UTC

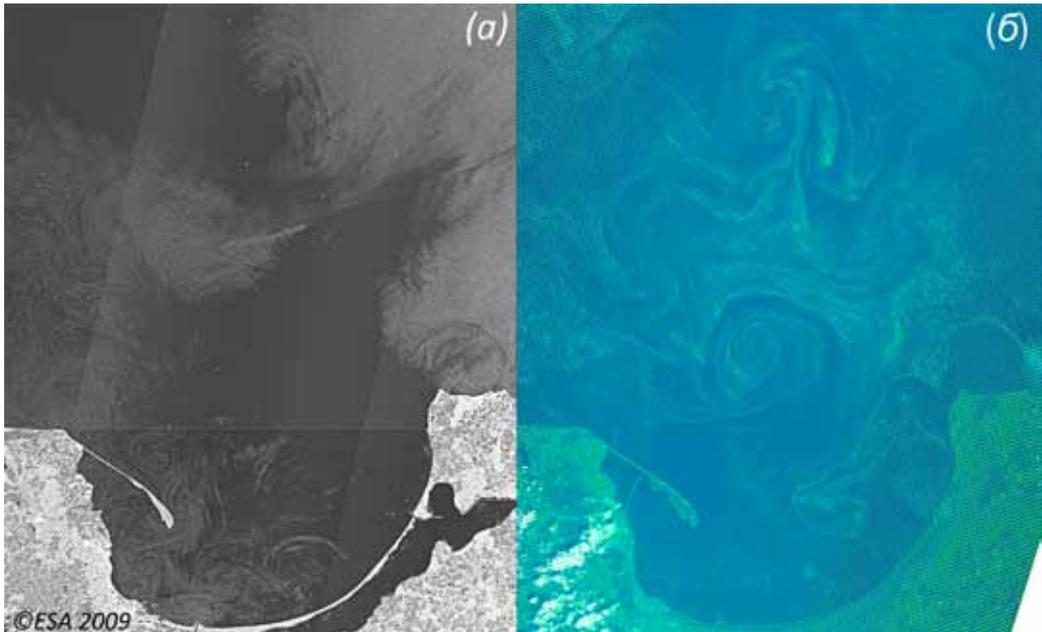


Рис. 5.30. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря на полученных квазисинхронно спутниковых изображениях различной природы: *a* — изображение ASAR Envisat, полученное 17.07.2009 г. в 09:01 UTC; *b* — цветосинтезированное изображение ETM+ Landsat-7, полученное 17.07.2009 г. в 09:33 UTC (каналы 3-й, 2-2, 1-й)

Приведенные примеры показывают, что совместный анализ спутниковых данных, полученных в разных диапазонах электромагнитных волн, позволяет восстановить более полную картину вихревой активности.

5.3.4. Мониторинг антропогенных загрязнений морской поверхности

Мониторинг антропогенного загрязнения прибрежной зоны — традиционная задача коллектива специалистов из ИКИ РАН, который, как уже отмечалось выше, в период с июня 2004 по ноябрь 2005 г. принимал активное участие в проведении оперативного спутникового мониторинга района нефтедобывающей платформы Д-6 на шельфе Калининградской области (месторождение Кравцовское) и всей юго-восточной части Балтийского моря (см. гл. 3), отвечая за получение, обработку и интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений. Начиная с 2006 г. в течение трех лет (2006–2008) этот коллектив участвовал в проведении оперативного мониторинга состояния и загрязнения морской среды российского сектора Черного и Азовского морей, который с 2003 г. осуществляется ГУ НИЦ «Планета» (см. гл. 4).

Начиная с 2009 г. мониторинг антропогенных загрязнений проводится уже на значительно больших площадях. В сферу интересов были включены полностью акватории Черного, Азовского, Балтийского морей, и добавилась акватория Каспийского

моря. Особый интерес представляет сравнение ранее полученных результатов с современной ситуацией.

Черное море

Результаты мониторинга показывают, что в Черном море наиболее часто несанкционированный сброс с судов вод, содержащих нефтепродукты, происходит в северо-западной части моря (рис. 5.31а, б, см. с. 293). В российской части Черного моря по-прежнему наибольшему загрязнению подвергаются акватория в районе порта Новороссийск и черноморское предпроливье Керченского пролива. В то же время, заметно меньше незаконных сбросов с судов выявлено в самом Керченском проливе,

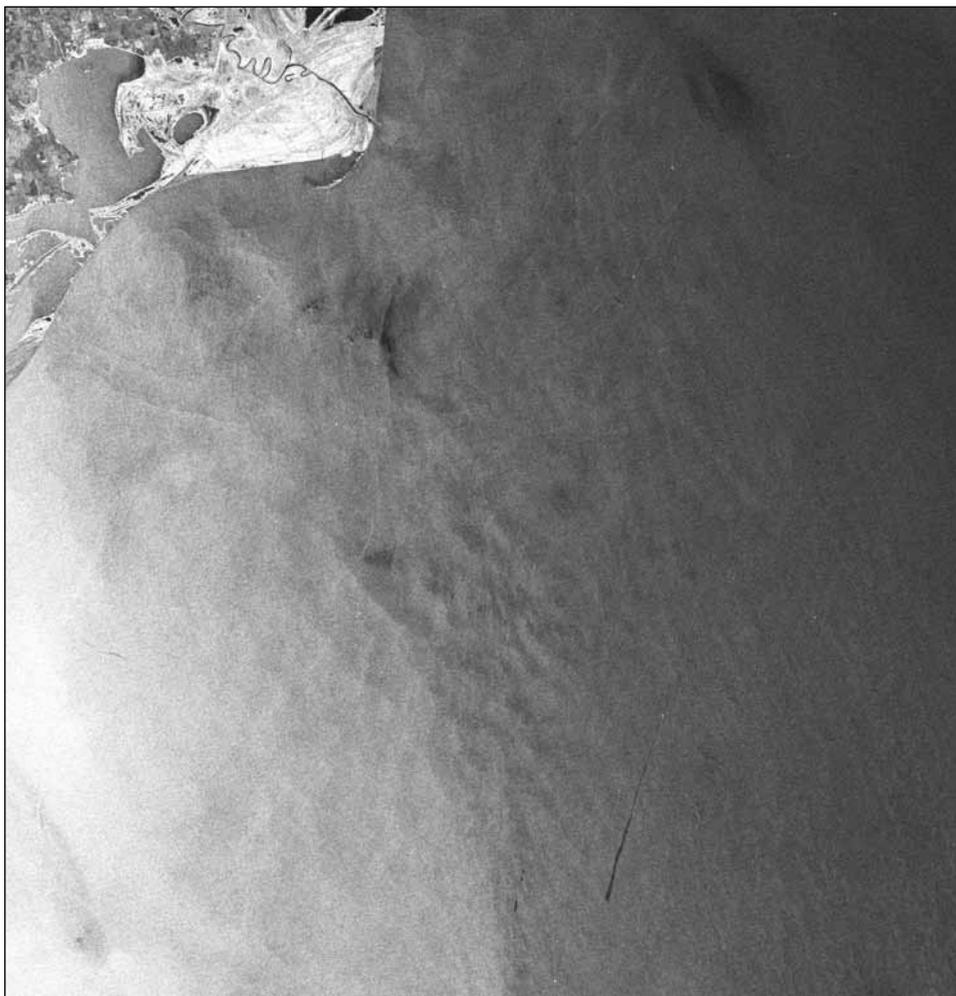
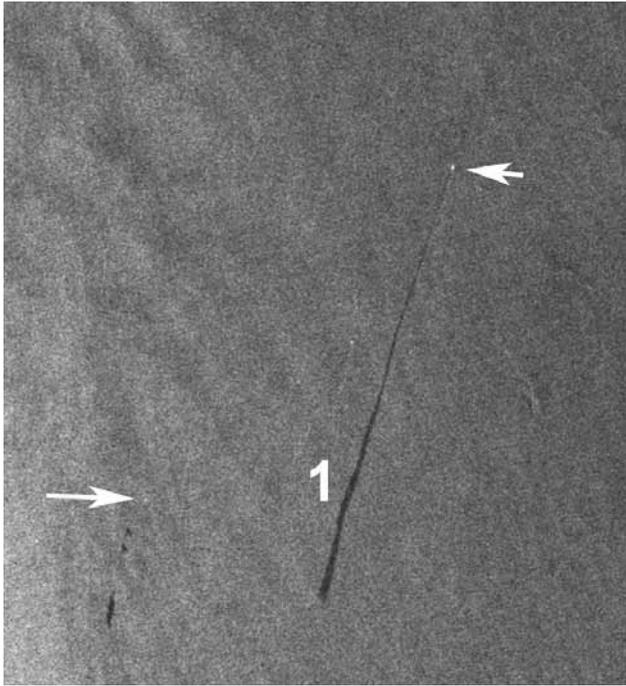


Рис. 5.31а. Загрязнение поверхности моря водами, содержащими нефтепродукты, в западной части Черного моря: фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 07.05.2010 г. в 19:41 UTC, VV-поляризация с разрешением в точке 75 м



Р и с . 5.31б. Загрязнение поверхности моря водами, содержащими нефтепродукты, в западной части Черного моря: увеличенный фрагмент (48×52 км) данного РЛИ, отражающий факты несанкционированных сбросов вод с нефтепродуктами с движущихся судов. Протяженность сброса, отмеченной цифрой 1, составляет 34 км. Стрелки указывают на положение судов, ответственных за сбросы

к которому после аварии танкера в ноябре 2007 г. было приковано пристальное внимание научной общественности и контролирующих организаций (см. гл. 8).

На рис. 5.32 (см. с. 294) представлена обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006 г. – август 2010 г. За пять лет спутниковых наблюдений в российском секторе Черноморского бассейна выявлено более 300 случаев загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов (из них около 70 в 2009 г. – август 2010 г.). Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 30 км². Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила более 800 км². Систематизация спутниковых данных по загрязнению северо-восточной части Черного моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволила выявить районы наиболее частого сброса вдоль судоходных трасс в Новороссийске и Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыс Железный Рог и в районе Керченского пролива.

Большой вклад в загрязнение прибрежной зоны вносят отслужившие свой срок очистные сооружения, построенные на Черноморском побережье. Во всем мире

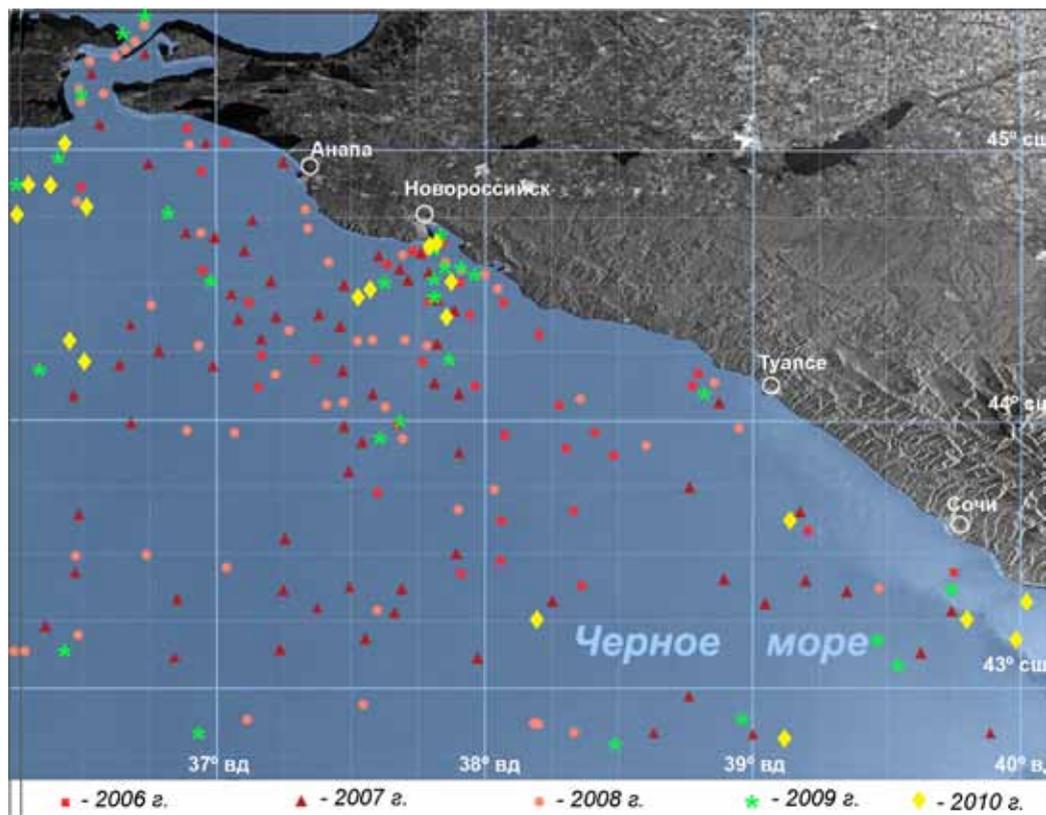
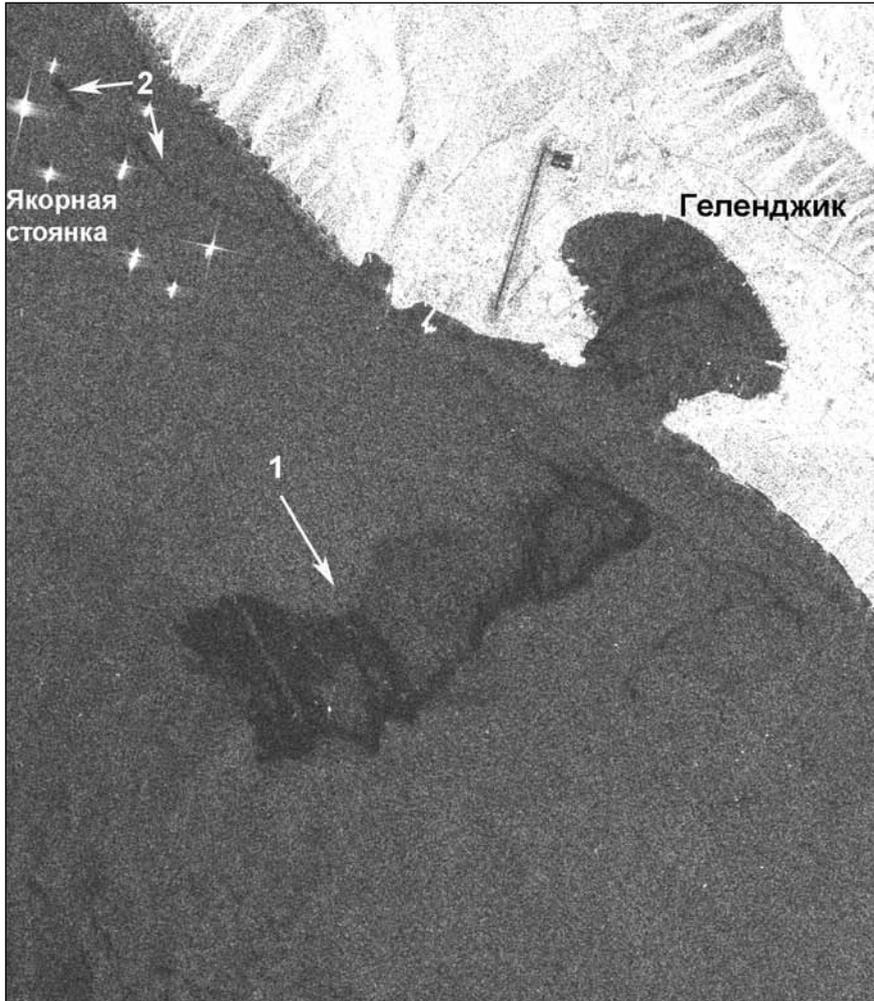


Рис. 5.32. Обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006–2010 гг.

мониторингу экологической ситуации вокруг глубоководных стоков уделяется очень большое внимание (Бондур, Гребенюк, 2001). Основными зонами риска на Черном море являются районы, прилегающие к городам Новороссийск, Геленджик, Туапсе и Сочи, а также места якорных стоянок, где сбрасываются в море технологические воды и фекально-бытовые отходы.

Система очистки сточных вод и трубопровод глубоководного выпуска в районе Геленджика давно вызывает серьезное беспокойство. В настоящее время Геленджик является крупнейшим в России после Сочи рекреационным центром на берегу Черного моря. Городские очистные коммуникации не рассчитаны на все возрастающий наплыв туристов. Уже сегодня, по некоторым данным, объем сброса с очистных сооружений почти вдвое превышает их проектную мощность. По проекту сброс сточных вод с городских очистных сооружений в море должен производиться по глубоководному выпуску, оголовков которого расположен в районе Толстого мыса южнее Геленджикской бухты на расстоянии 2095 м от берега на глубине около 30 м. Однако уже много лет глубоководный выпуск имеет серьезные повреждения, и часть очищенных



Р и с . 5.33. Утечка сточных вод из глубоководного выпуска у Толстого мыса (1) и сброс технологических вод с судов, находящихся на якорной стоянке «Дооб» (2). Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 29.09.2010 г. в 07:29 UTC с разрешением в точке 12,5 м

сточных вод сбрасывается в прибрежной полосе. В мае 2010 г. разгорелся скандал, когда проверкой, проведенной сотрудниками Азово-Черноморской межрайонной природоохранной прокуратуры и Росприроднадзора, было установлено, что один из глубоководных выпусков сточных вод в районе Толстого мыса Геленджикской бухты разорвался в 300 метрах от берега, из-за чего фекальные и хозяйственные стоки под огромным давлением хлестали во все стороны, заливая береговую линию и пляжи. К сожалению, такая ситуация повторяется регулярно. В частности, на РЛИ, полученном 29.09.2010 г. (рис. 5.33), хорошо видна обширная темная область (отмечена цифрой 1), подвергшаяся загрязнению.



Р и с . 5.34а. Утечка сточных вод из трубопроводов глубоководного выпуска в районе Геленджика: 1 — трассы глубоководных выпусков; 2 — место утечки; 3 — зона загрязнения (3360 м²) © СЦГМС ЧАМ



Р и с . 5.34б. Утечка сточных вод из трубопроводов глубоководного выпуска в районе пос. Джубга: 1 — трасса глубоководного выпуска; 2 — место утечки; 3 — зона загрязнения (7300 тыс. м²). Снимки сделаны с борта вертолета СЦГМС ЧАМ 24 августа 2003 г. (© СЦГМС ЧАМ)

Для примера на рис. 5.34а (см. с. 296) приведен снимок, сделанный с вертолета специалистами ГУ «Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей» (СЦГМС ЧАМ) Росгидромета в Сочи (Отчет о результатах работ..., 2005). Подобная ситуация, к сожалению, характерна не только для района Геледжика, но и для всего побережья Черного моря (рис. 5.34б, см. с. 297). Пока не будет полностью заменено устаревшее оборудование, ситуация будет только усугубляться, что не только приведет к загрязнению прибрежных вод, но и будет наносить вред здоровью людей.

Каспийское море

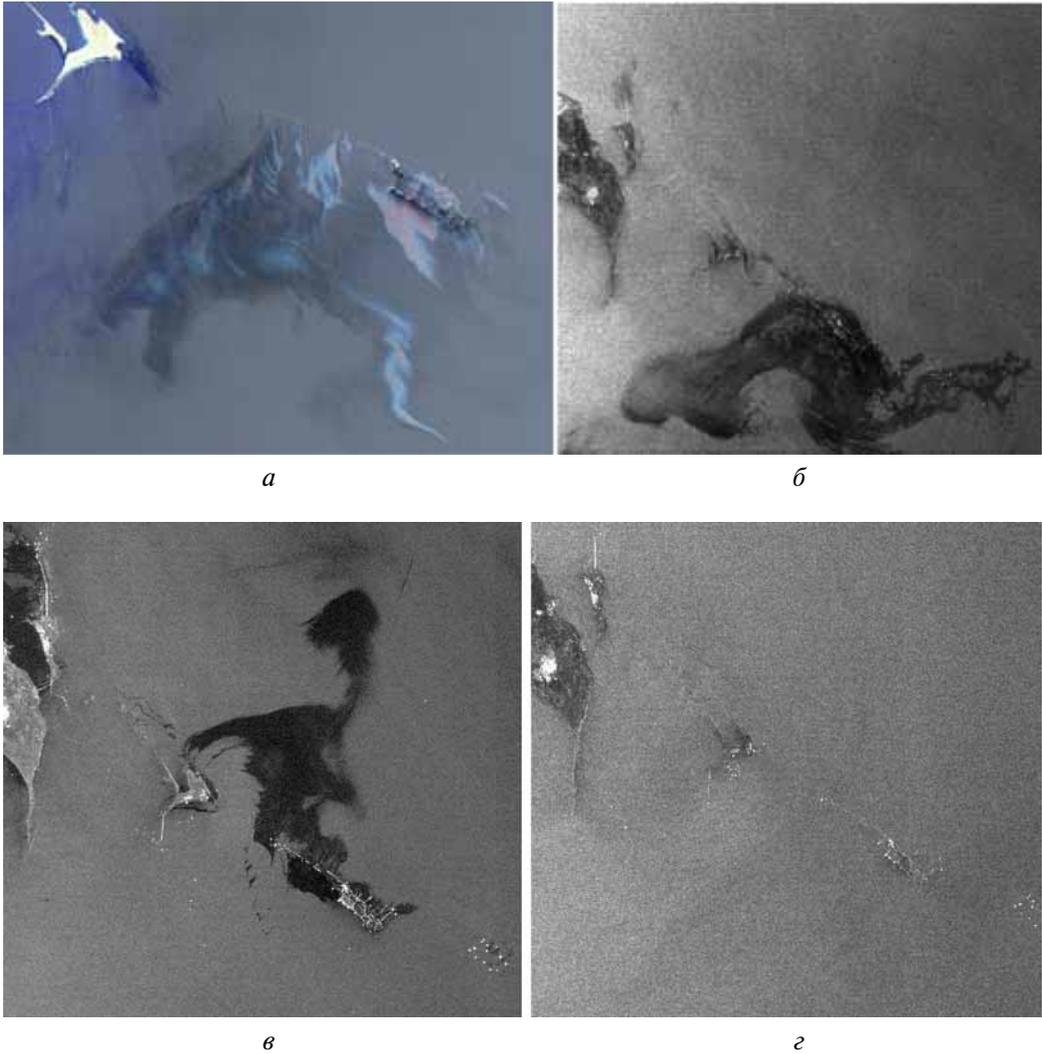
Каспийское море испытывает интенсивную антропогенную нагрузку как на самой акватории, так и в водосборном бассейне. По данным Росгидромета к началу 2000 г. воды открытой части Среднего Каспия оценивались как «загрязненные», а дельты Волги и дагестанского побережья как «грязные» с повышенным сверхнормативным содержанием фенолов, соединений азота, фосфора и других токсикантов. Особенно опасно загрязнение вод моря нефтепродуктами в связи с разработкой морских месторождений нефти и газа.

Разведанные запасы углеводородов в Каспии — более 10 млрд т (на российский шельф Северного Каспия приходится 1 млрд т, азербайджанский — 4–5 млрд т). Для сравнения, разведанные запасы нефти в Персидском заливе составляют более 20 млрд т.

Характерная особенность процесса морской разведки и нефтедобычи — образование искусственных грифонов (выхода нефти из скважин на поверхность). Так, на месторождении «Нефтяные Камни» из грифонов поступает до 500 т нефти в сутки. Проблему усугубляет изношенность оборудования, что приводит к добавочному загрязнению вод. Высокая концентрация нефтепродуктов отмечается во всей толще воды, особенно в ее верхнем слое, причем следы нефти выявлены на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ. Например, загрязнение вод нефтепродуктами в зоне Бакинского архипелага и Апшеронского полуострова сейчас достигает 8000 ПДК, поэтому эти районы полностью потеряны для рыбного хозяйства. На приустьевых участках Волги и Урала, в районе Тенгизского месторождения загрязнение достигает 20 ПДК.

При росте темпов нефтяного освоения Каспия и отсутствии государственного контроля деятельности нефтяных компаний можно погубить все живое в водоеме. Поэтому спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений на Каспии представляется чрезвычайно актуальным.

На всех без исключения РЛИ, полученных во время проведения мониторинга в районах нефтедобычи в районе Апшеронского полуострова, идентифицируются нефтяные пятна. Данные, полученные во время мониторинга в 2009–2011 гг., сравнивались с архивными за 2003, 2006 и 2007 гг., ситуация практически та же. Размер и распространение пятна меняется только от метеоусловий. Район месторождения «Нефтяные Камни» является своеобразной естественной лабораторией, в которой рассматривалось влияние ветра и течений на распространение нефтяного пятна, а также влияние ветра на формирование радиолокационных образов нефтяных загрязнений. На рис. 5.35 (см. с. 299) представлены фрагменты спутниковых изображений, полученные в районе «Нефтяных Камней» при разных метеорологических условиях.



Р и с . 5.35. Загрязнения акватории Каспийского моря в районе нефтепромысла «Нефтяные Камни», проявляющиеся на спутниковых изображениях при различных метеорологических условиях: *а* — ветер северный 8 м/с. Фрагмент изображения ТМ Landsat-5, полученного в зоне солнечного блика 30.05.2009 г. в 07:07 UTC, композит 7-го, 4-го и 2-го спектральных каналов, разрешение 30 м, площадь загрязнения 280 км²; *б* — ветер северный 5 м/с с переходом на южный. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 31.05.2009 г. в 18:20 UTC, разрешение в точке 75 м, площадь загрязнения 800 км² (© ESA); *в* — умеренный юго-восточный ветер 4 м/с. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 28.07.2010 г. в 18:26 UTC, разрешение в точке 75 м, площадь загрязнения 350 км² (© ESA); *г* — сильный северный ветер 12 м/с. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM НН, полученного 19.06.2009 г. в 18:23 UTC, разрешение в точке 75 м, загрязнения практически не наблюдаются (© ESA)

Изображение, полученное ТМ Landsat-5 (см. рис. 5.35а), и РЛИ ASAR Envisat (см. рис. 5.35б) получены с разницей в 35 часов. За это время скорость ветра уменьшилась с 8 до 5 м/с, и его направление сменилось с северного на южное. Поворот ветра на 180° способствовал завихрению пятна, а уменьшение его скорости — увеличению площади загрязнения. Общая площадь загрязнения в районе нефтедобычи «Нефтяные Камни» увеличилась с 280 км² 30.05.2009 г. (см. рис. 5.35а) до 800 км² 31.05.2009 г. (см. рис. 5.35б). Безусловно, резкая смена направления ветра также спо-

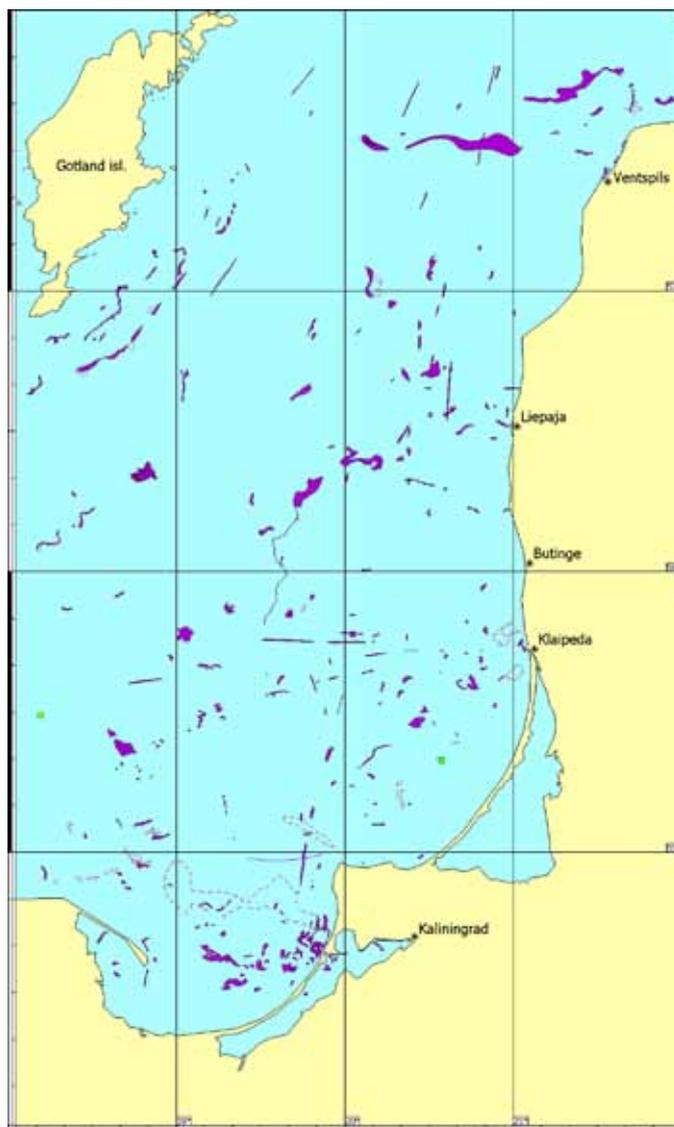


Рис. 5.36а. Обобщенные карты-схемы всех нефтяных пятен, обнаруженных в юго-восточной части Балтийского моря в результате анализа РЛИ с июня 2004 по ноябрь 2005 г.

способствовала разному загрязнению по большой акватории морской поверхности. Под действием умеренного юго-восточного ветра со скоростью 4 м/с нефтяное пятно растянулось на 350 км² (см. рис. 5.35е). При сильных ветрах (12 м/с) нефтяные загрязнения на РЛИ практически не проявляются (см. рис. 5.35з).

Оптическое изображение, представленное на рис. 5.35а, получено в зоне солнечного блика, на нем хорошо проявляется характерная радужка в районе нефтяного пятна, что не оставляет никаких сомнений о характере его происхождения.

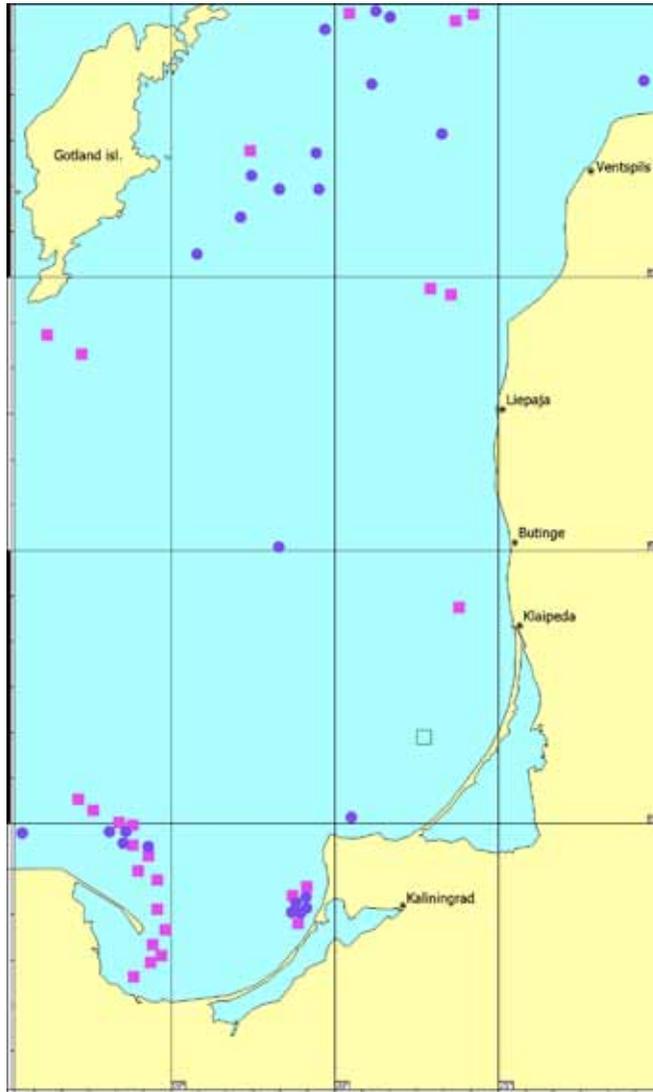


Рис. 5.36б. Обобщенные карты-схемы всех нефтяных пятен, обнаруженных в юго-восточной части Балтийского моря в результате анализа РЛИ с января 2009 по август 2010 г. Кружочки — 2009 г., квадратики — 2010 г. Зеленый квадратик — нефтедобывающая платформа Д-6

В отличие от ситуации в Черном и, особенно, в Балтийском морях, несанкционированные сбросы нефтепродуктов с судов на Каспии с каждым годом увеличиваются. Наибольшим загрязнениям такого типа подвержены районы у побережья Азербайджана и Туркменистана.

Балтийское море

В Балтийском море ситуация, связанная с антропогенными загрязнениями, в последние годы значительно улучшилась. Это является следствием усиленного контроля различных организаций стран региона за экологическим состоянием вод. Основные источники загрязнений остаются прежними: несанкционированный сброс с судов нефтепродуктов и вынос загрязненных вод реками и из Калининградского обводного канала. Сброс с судов традиционно осуществляется на якорной стоянке в районе Балтийска, на основных судоходных трассах вдоль о-ва Готланд, севернее Гданьского залива и на подходах к крупным портам: Клайпеда, Лиепая, Вентспилс и Гданьск. Интересно сравнить количество и местоположение судовых загрязнений, выявленных за 18 месяцев проведения мониторинга в 2004–2005 гг. (рис. 5.36а, см. с. 300) и за 18 месяцев с января 2009 по август 2010 г. (рис. 5.36б, см. с. 301). Как было отмечено в гл. 3, во время проведения мониторинга на поверхности юго-восточной части Балтийского моря было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов. Во время проведения мониторинга в 2009 г. – август 2010 г. всего было детектировано 79 пятен нефтяных загрязнений, из них 47 в течение 2009 г. и 32 — в период январь-август 2010 г.

5.3.5. Естественные загрязнения морской поверхности

Одна из наиболее сложных задач мониторинга загрязнения морской поверхности — различение поверхностных пленок естественного и антропогенного происхождения (Митягина, Лаврова, 2007). Чаще всего возникает необходимость различать слики, обусловленные присутствием нефтепродуктов, и полосы и пятна понижения сигнала, связанные с наличием пленок поверхностно-активных веществ биогенного происхождения и цветением водорослей.

Для повышения надежности извлечения необходимой информации из данных радиолокационного зондирования рекомендуется:

- привлекать для совместного анализа данные, получаемые разными сенсорами с разных спутников в оптическом и ИК-диапазонах;
- создать каталог наиболее часто встречающихся в районе интереса явлений и соответствующих им радиолокационных образов в целях помощи оператору в дешифровке радиолокационных изображений;
- составить «паспорт» местности, включающий описание характерных процессов и явлений в прибрежной зоне в зависимости от времени года, гидрометеорологических условий, времени суток, направлений течений для понижения вероятности ложной тревоги. Сопоставлять спутниковые изображения с картой возможных источников регулярных загрязнений (глубоководный сброс сточных вод, нефтяные терминалы, устья рек, подводные грязевые вулканы и т. д.).

Ниже будут более детально рассмотрены естественные загрязнения, характерные для каждого района проведения спутникового мониторинга.

Черное море

Наш многолетний опыт проведения спутникового мониторинга различных морей показывает, что для акватории Черного моря задача различения пленочных загрязнений морской поверхности существенно осложняется наличием двух факторов:

- грязевый вулканизм и естественные выходы углеводородов (метановые сипажи), которые обнаруживаются в Черном море практически повсеместно;
- особенности видового состава и пространственно-временной изменчивости развития планктонных организмов.

Естественные выходы углеводородов. Обобщение результатов многолетних спутниковых наблюдений поверхности Черного моря позволило выделить районы, в которых регулярно наблюдаются сликовые образования, внешне схожие с судовыми сбросами вод, содержащих нефтепродукты, но имеющие ряд отличительных особенностей. К числу этих особенностей следует отнести большие размеры, своеобразную геометрическую форму и относительное постоянство географического места их проявления. На рис. 5.37 (см. с. 304) приводятся примеры радиолокационных образов подобных структур, идентифицированных в различных районах Черного моря. Практически все представленные на рисунке изображения отражают, по всей видимости, биогенные пленки, связанные с цветением водорослей. Но не исключена вероятность, что, например, множественные темные пятна, различимые на рис. 5.37г, имеют другое происхождение, в частности, могут представлять собой поверхностные проявления выходов газогидратов.

Для объяснения результатов наблюдений сликовых образований, проявляющихся регулярно в одних и тех же районах, была выдвинута гипотеза, что географическое распределение описанных выше сликовых структур соответствует географическому распределению мест локализации естественных проявлений углеводородов в Черном море. Понятие естественных проявлений углеводородов в данном случае включает в себя грязевый вулканизм, естественные газо- и нефтепроявления, газогидраты.

Согласно опубликованным результатам серий натурных экспериментов, проводившихся с 1993 г. по настоящее время, в Черном море обнаружены струйные газовыделения и холодные метановые сипы по периметру свала глубин и в глубоководной части (Круглякова и др., 2009), а также районы локализации глубоководных грязевых вулканов (Иванов и др., 1989). На рис. 5.38 (см. с. 305) приведена обобщенная карта-схема различных видов газопроявлений (газовые выходы, грязевые вулканы), составленная авторами по литературным данным (Круглякова и др., 2009, Егоров и др., 2011).

Районами наиболее интенсивных проявлений разгрузки углеводородных газов из недр в толщу воды являются:

- шельф Болгарии (свыше 480 выходов газа на дне моря);
- шельф Украины в северной и северо-западной частях Черного моря (около 200);
- Керченско-Таманский шельф;

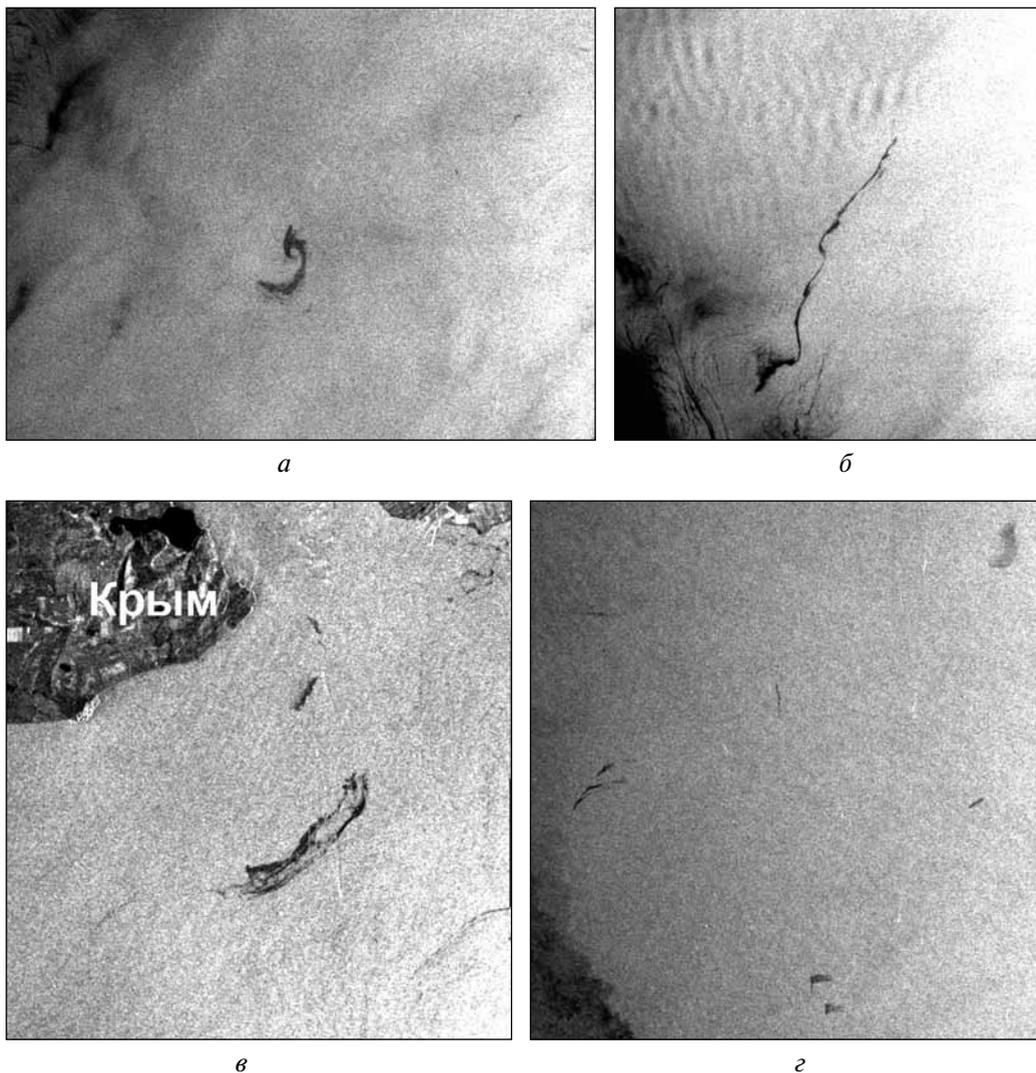


Рис. 5.37. Примеры сликовых образований, допускающих неоднозначную интерпретацию: *а* — фрагмент изображения ASAR Envisat (70×50 км), полученного 07.02.2009 г. в 07:54 UTC в глубоководной части Черного моря южнее Крыма; *б* — фрагмент ASAR Envisat изображения (50×50 км), полученного 07.02.2009 г. в 07:54 UTC над акваторией Турецкого шельфа; *в* — фрагмент изображения SAR ERS-2 (47×50 км), полученного 18.04.2009 г. в 08:21 UTC в Керченском проливе; *г* — фрагмент изображения SAR ERS-2 (57×60 км), полученного 17.09.2009 г. в 08:42 UTC над акваторией Болгарского шельфа. Все представленные на рисунке РЛИ получены с разрешением в точке 75 м

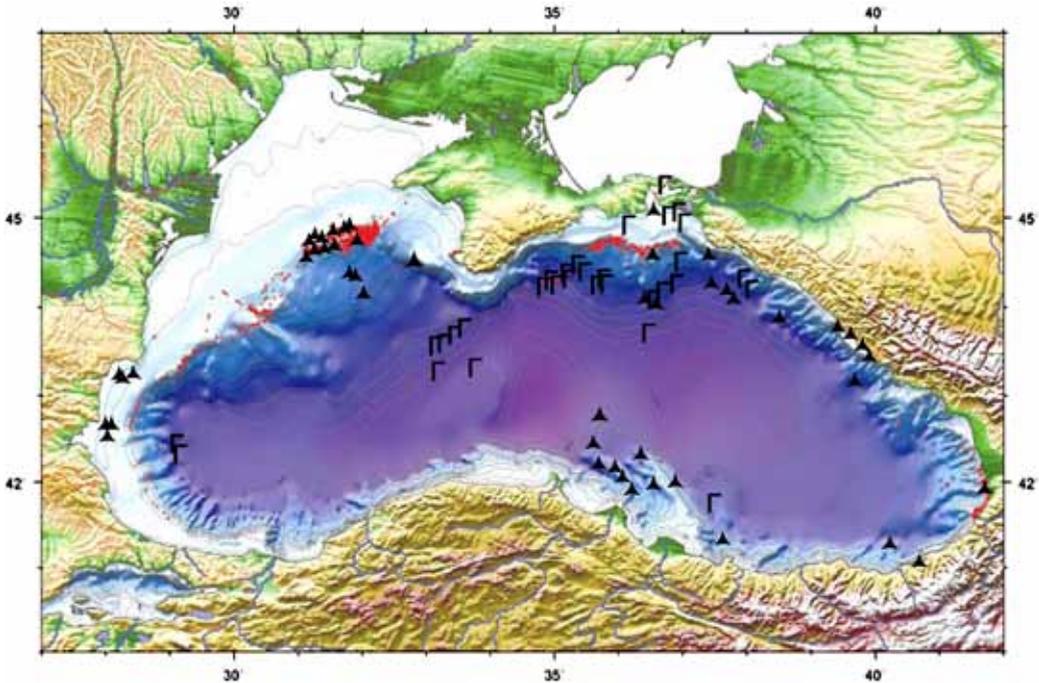


Рис. 5.38. Карта-схема распределения струйных метановых газовыделений в Черном море: красные точки — задокументированные метановые выделения; черные треугольники — выходы нефти и газа на поверхность; Г — грязевые вулканы

- шельф России по всей площади сочи-адлерской депрессии;
- грузинский шельф и континентальный склон;
- турецкий шельф в прибрежной зоне восточных Понтид в районе Ризе;
- глубоководная часть. Свыше 60 грязевых вулканов задокументировано к настоящему времени в Черном море, преимущественно, в центральной его части и в прогипе Сорокина на глубинах свыше 1500 м (*Шнюков, Клещенко, 2001*).

Выходы струйных метановых газовыделений из грязевых вулканов и метановых сипов проявляются на морской поверхности за счет различных механизмов. Вместе с пузырьками углеводородных газов, поднимающихся из недр на морскую поверхность, могут выноситься как скопления морских микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности, так и капли нефти.

Следует отметить, что радиолокационные образы сликов, обусловленных скоплением планктонных организмов и присутствием нефтяного загрязнения, бывают схожими между собой (см. гл. 2). Для более уверенного различения этих двух видов пленочных загрязнений морской поверхности и повышения достоверности интерпретации спутниковой информации необходимо привлечение данных спутниковых сенсоров оптического диапазона высокого разрешения. Оптимальным является использование оптических изображений, полученных в зоне солнечного блика с



Рис. 5.39. Выделившиеся со дна нефтяные капли достигают поверхности моря. Фотография с борта судна (Егоров и др., 2011)

разрешением в точке лучше, чем 30 м. Наличие на изображении пятна характерного радужного ореола позволяет с уверенностью отнести его к категории нефтесодержащего загрязнения. Пример проявления на оптическом снимке нефтяных капель, выделившихся со дна и достигших поверхности моря, представлен на рис. 5.39, фотография получена в грузинском секторе Черного моря. Согласно опубликованным данным, в грузинском секторе Черного моря было выявлено 565 выходов струйного газа, расположенных на глубинах 14–1120 м. При этом наибольшая частота встречаемости сипов наблюдалась в приустьевых участках шельфа рек Чорохи, Кинтриши, Натанеби, Супса, Риони и Ингури. Кроме того, значительное количество выходов газовых струй было обнаружено на глубинах 850–1200 м. Это позволяет предположить, что на шельфе Грузии реализуются процессы образования струйных газовыделений в результате метаногенеза в речных осадках.

Все радиолокационные изображения акватории Черного моря в районе грузинского шельфа, полученные за период 2009 г. – май 2011 г., были проанализированы с целью обнаружения на них характерных сликовых структур, которые могли быть обусловлены процессами струйных газовыделений со дна. Всего за этот период было получено 67 РЛИ района интереса. На 42 изображениях были идентифицированы сликовые структуры, привязанные к точке с координатами $41^{\circ}58'59''$ с.ш. и $41^{\circ}07'30''$ в.д. На рис. 5.40 (см. с. 307–309) приведены наиболее характерные примеры.



Рис. 5.40а, б. Примеры проявлений сликовых структур, привязанных к точке с координатами $41^{\circ}58'59''$ с.ш. и $41^{\circ}07'30''$ в.д. (отмечена стрелкой). Фрагменты изображений ASAR Envisat, полученных на VV-поляризации с разрешением в точке 75 м: а — 12.06.2009 г. в 07:26 UTC; б — 16.06.2010 г. в 07:28 UTC

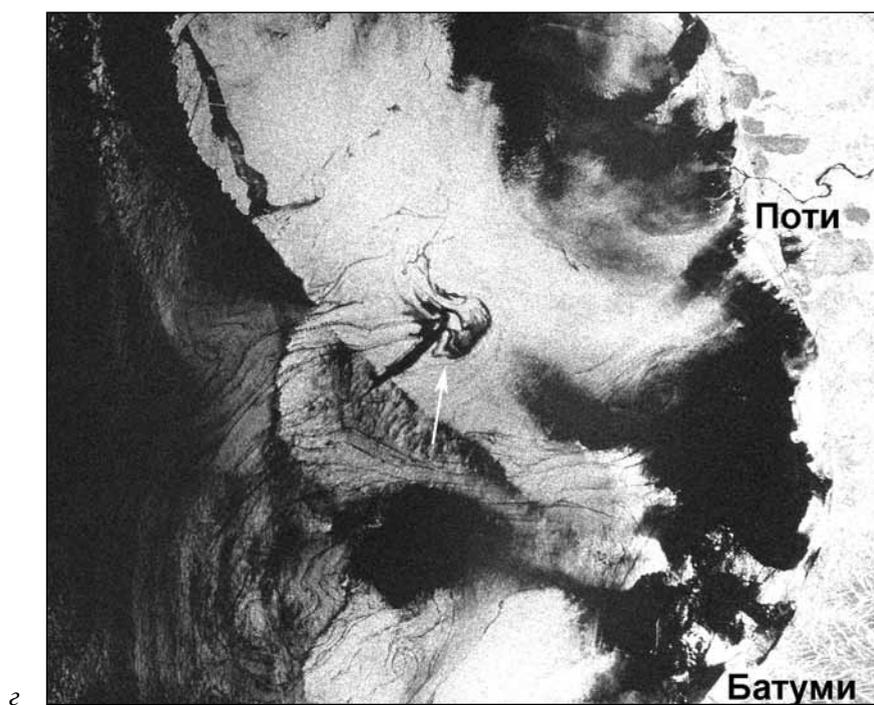
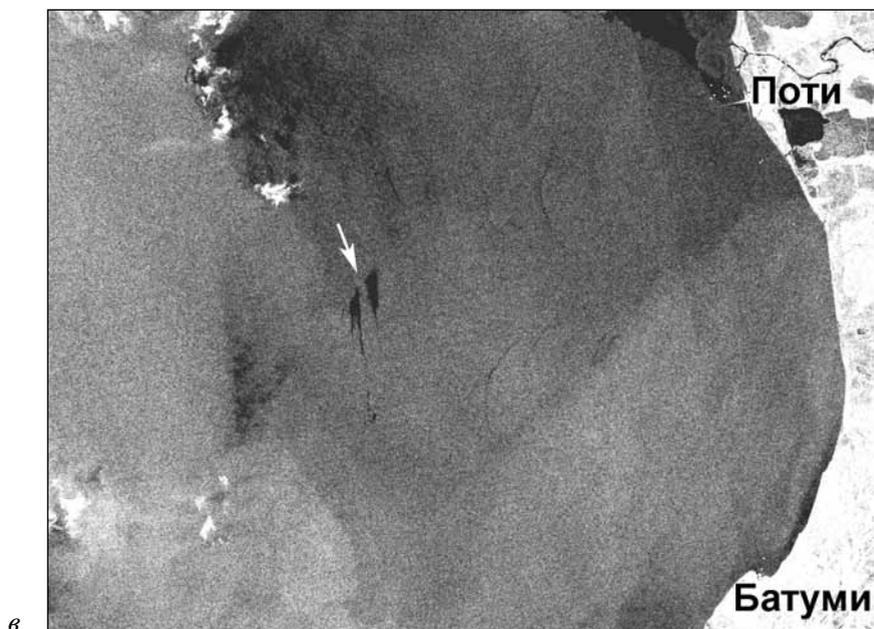
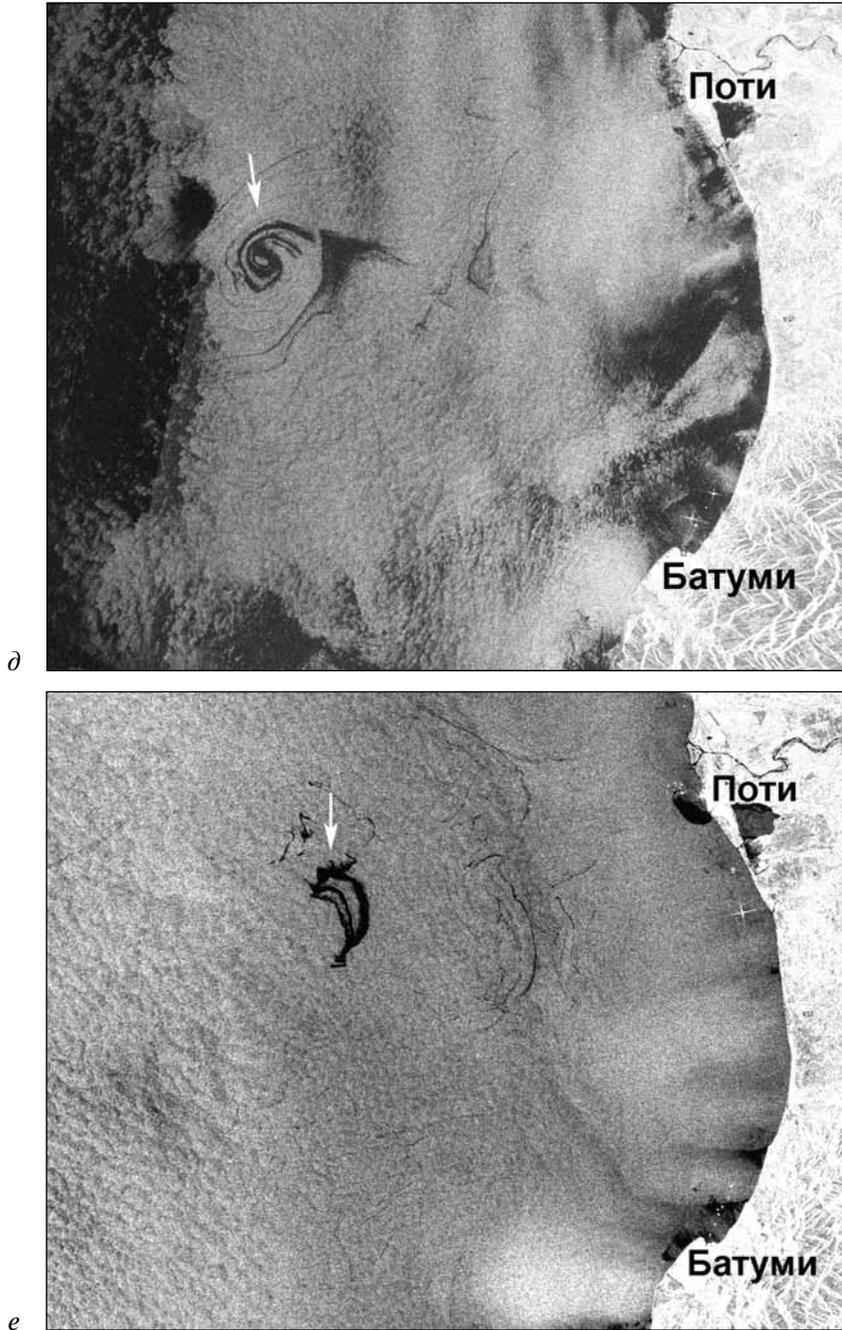


Рис. 5.40а, б. Пример проявлений сликовых структур, привязанных к точке с координатами $41^{\circ}58'59''$ с.ш. и $41^{\circ}07'30''$ в.д. (отмечена стрелкой). Фрагменты изображений ASAR Envisat, полученных на VV-поляризации с разрешением в точке 75 м: а — 14.07.2010 г. в 19:03 UTC; б — 18.10.2010 г. в 07:31 UTC



Р и с . 5.40д, е. Пример проявлений сликовых структур, привязанных к точке с координатами $41^{\circ}58'59''$ с.ш. и $41^{\circ}07'30''$ в.д. (отмечена стрелкой). Фрагменты изображений ASAR Envisat, полученных на VV-поляризации с разрешением в точке 75 м: д — 06.01.2011 г. в 07:32 UTC; е — 11.01.2011 г. в 19:02 UTC

В большинстве случаев (28) эти сликовые структуры проявляются в виде нитевидных сликов, характерных для органических пленок естественного происхождения, повсеместно встречающихся на морской поверхности в областях повышенной биологической активности, особенно в прибрежной зоне. Они практически не выделяются на общем фоне (см. рис. 5.40г). Учитывая все вышесказанное, делать далеко идущие выводы о наличии в данном районе нефтяного месторождения (http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n95225234), основываясь только на анализе РЛИ, на наш взгляд не представляется возможным.

Нельзя с уверенностью утверждать, что идентифицированные слики обусловлены присутствием нефти на поверхности. С равной долей вероятности они могут быть обусловлены скоплением фитопланктона, вынесенного пузырьками газа на поверхность. Подобные биогенные пленки чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции.

В ходе серии морских экспедиций было установлено (*Шнюков* и др., 2010; *Авилов, Авилова*, 2007, 2001), что биологическая активность вод над флюидопроявлениями (подводные грязевые вулканы, струйные газовыделения, газовые факелы, газогидраты) превышает фоновое состояние на 1–2 порядка. В частности, над грязевым вулканом Двуреченский (глубина моря 2060 м) биохимические показатели оказались в 80 раз выше фоновых. В воде над газовыми факелами измеренные величины биохимических показателей еще выше. Флюидопроявление на дне сопровождается не только выходом пузырьков газа, но и выносом вместе с ними питательных веществ из осадков. Исследования показали, что биохимические определения являются эффективным критерием обнаружения потоков флюидов из осадков в воду.

Для решения вопроса о принадлежности детектированных в этом районе пленочных загрязнений морской поверхности к нефтесодержащим или биогенным пленкам необходимо продолжить регулярные наблюдения района интереса с привлечением изображений в различных диапазонах электромагнитного спектра. Кроме того, подобные наблюдения следует распространить на другие районы Черного моря, известными проявлениями струйных газовыделений различной природы.

Цветение фитопланктона. Как уже неоднократно отмечалось выше, при проведении мониторинга антропогенных загрязнений, особенно при выявлении несанкционированных сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты, возникает сложность дискриминации радиолокационных образов антропогенных и естественных биогенных пленок. Если длинный темный след наблюдается на РЛИ сразу или практически сразу за кораблем, которому на радиолокационных снимках соответствует яркая белая точка, то, как правило, темный след однозначно идентифицируют, как сброс с судна загрязненных вод. Однако при активном цветении фитопланктона темный след может быть никак не связан с антропогенным загрязнением. В статье (*Скворцов* и др., 2010) предложено следующее объяснение этого явления.

В основе механизма образования на морской поверхности органической плёнки, состоящей из микроводорослей фитопланктона, может лежать известный процесс извлечения из воды различных веществ с помощью мелких пузырьков воздуха – флотация. При движении судов и при обрушении волн образуется большое число воздушных пузырьков различных размеров. Крупные пузырьки всплывают быстро, а основная масса с размерами менее 1 мм всплывает со скоростью 1–10 см/с. Для

крупнотоннажных судов с осадкой 10–15 м время всплытия может составлять 20–25 и более минут. Поэтому, как показывают примеры, приведенные в цитируемой работе (Скворцов и др., 2010), плёночный след за кораблем проявляется на поверхности моря примерно через 25 минут после прохождения судна и восстановления поверхностного ветрового волнения.

При соприкосновении воздушного пузырька с гидрофобной частью клетки фитопланктона плёнка воды стягивается силами поверхностного натяжения и происходит присоединение клетки фитопланктона к пузырьку. Далее клетка всплывает вместе с пузырьком и после разрушения последнего остаётся в пограничном слое воды. Такой процесс увеличения концентрации клеток фитопланктона должен приводить к изменению электрофизических параметров приповерхностного слоя, что в свою очередь должно изменять характеристики отражённых сигналов в микроволновом диапазоне. При большом количестве мелких (менее 1 мм) медленно всплывающих пузырьков на морской поверхности будет образовываться плёнка из планктона и продуктов его жизнедеятельности, достаточная для заметного гашения гравитационно-капиллярных волн и образования выглаженных полос-сликов.

Однако результаты мониторинга в разных морях во время активного цветения фитопланктона показывают, что следы за кораблями в этот период проявляются в виде ярких, длинных, протяженностью до 100 км белых полос. Причем это не зависит от типа фитопланктона и такой эффект наблюдается как в Черном, Балтийском, Каспийском морях, так и в Горьковском водохранилище, где проводились подспутниковые эксперименты совместно с коллегами из Института прикладной физики РАН (http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa11/pdf/Lavrova_Ermakov.pdf).

Еще одно интересное явление, связанное с активным цветением водорослей, удалось пронаблюдать при проведении спутникового мониторинга северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). 11–12 июля 2010 г. в прибрежных морских водах Одессы было зарегистрировано большое пятно цветения воды, вызванное резким увеличением количества сине-зеленых водорослей *Nodularia spumige*. По данным многолетнего мониторинга прибрежных вод Одессы, проведенного Украинским научным центром экологии моря, ранее в одесском прибрежье этот вид фитопланктона встречался только в единичных экземплярах. В местах концентрации цветения фитопланктона вода была мутной, прозрачность не превышала 0,5 м. Максимум цветения был отмечен 12 июля, при этом вода была бурой с большим количеством слизи из-за множества длинных нитей нодулярии, видимых невооруженным глазом. В пятнах концентрации цветения фитопланктона, кроме нодулярии, было отмечено значительное количество клеток других видов фитопланктона, а именно бентосные формы, также зарегистрированы виды, которые относятся к потенциально токсичным: *Prorocentrum micans*, *P. minimum*, *P. compressum*, *P. lima*, *Dinophysis sacculus*, *D. norvegica* и др.

Пространственное распределение и скорость формирования и распространения цветения воды в шельфовой зоне СЗЧМ хорошо прослеживалось по спутниковым данным MODIS Aqua и Terra. 2–4 июня отмечена начальная фаза цветения воды, которая охватывала прибрежную и более мористую части Одесского региона от порта Ильичевск до порта Южный (рис. 5.41а, см. с. 312). В течение 8–12 июля преобладали северная и восточная составляющие ветра, пятно цветения воды распространялось как вдоль Тендровской косы, так и вдоль западного побережья Одесского региона.

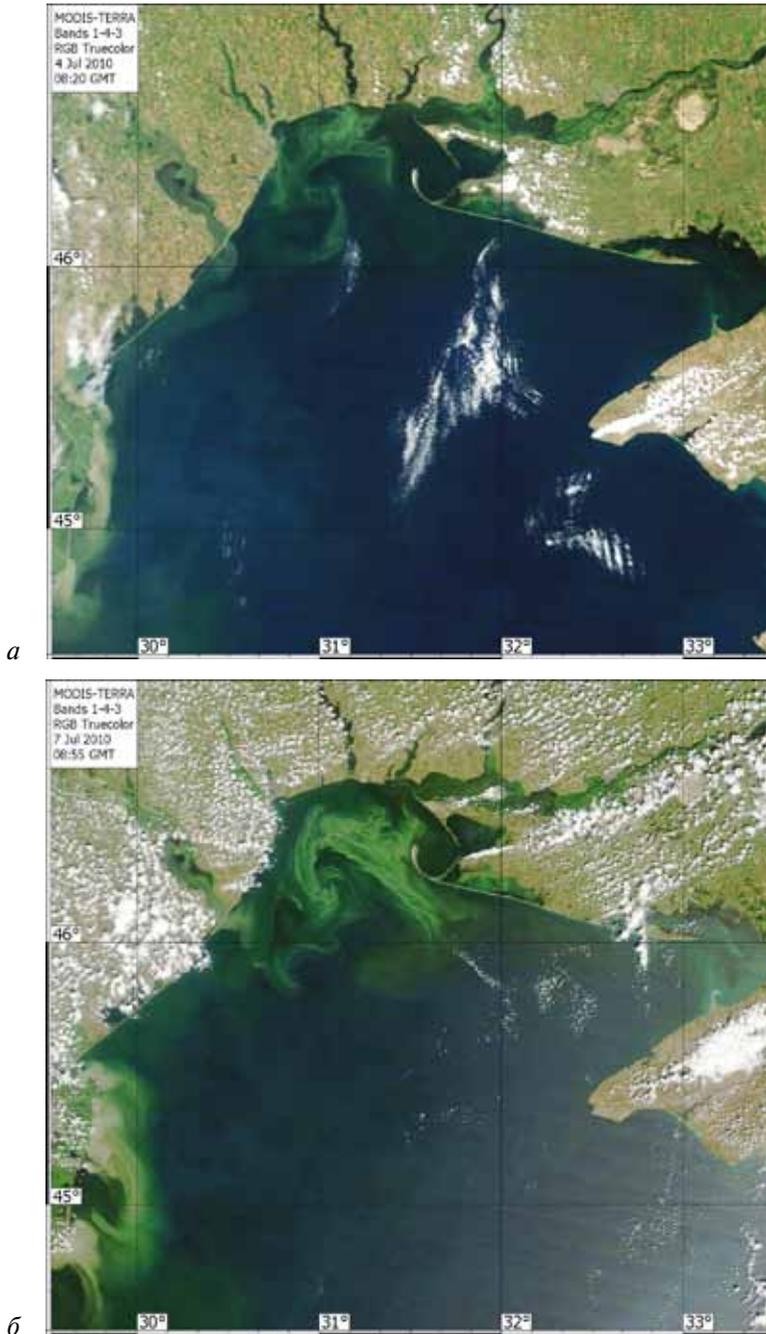


Рис. 5.41*a, б*. Аномальное цветение водорослей в северо-западной части Черного моря в июле 2010 г. Цветосинтезированные изображения (каналы 1-й, 4-й и 3-й) сенсора MODIS Тегга получены с разрешением 250 м: *a* — 04.07.2009 г. в 08:20 UTC; *б* — 07.07.2009 г. в 08:55 UTC. Изображения любезно предоставлены Соловьевым Д. М. (МГИ НАНУ)

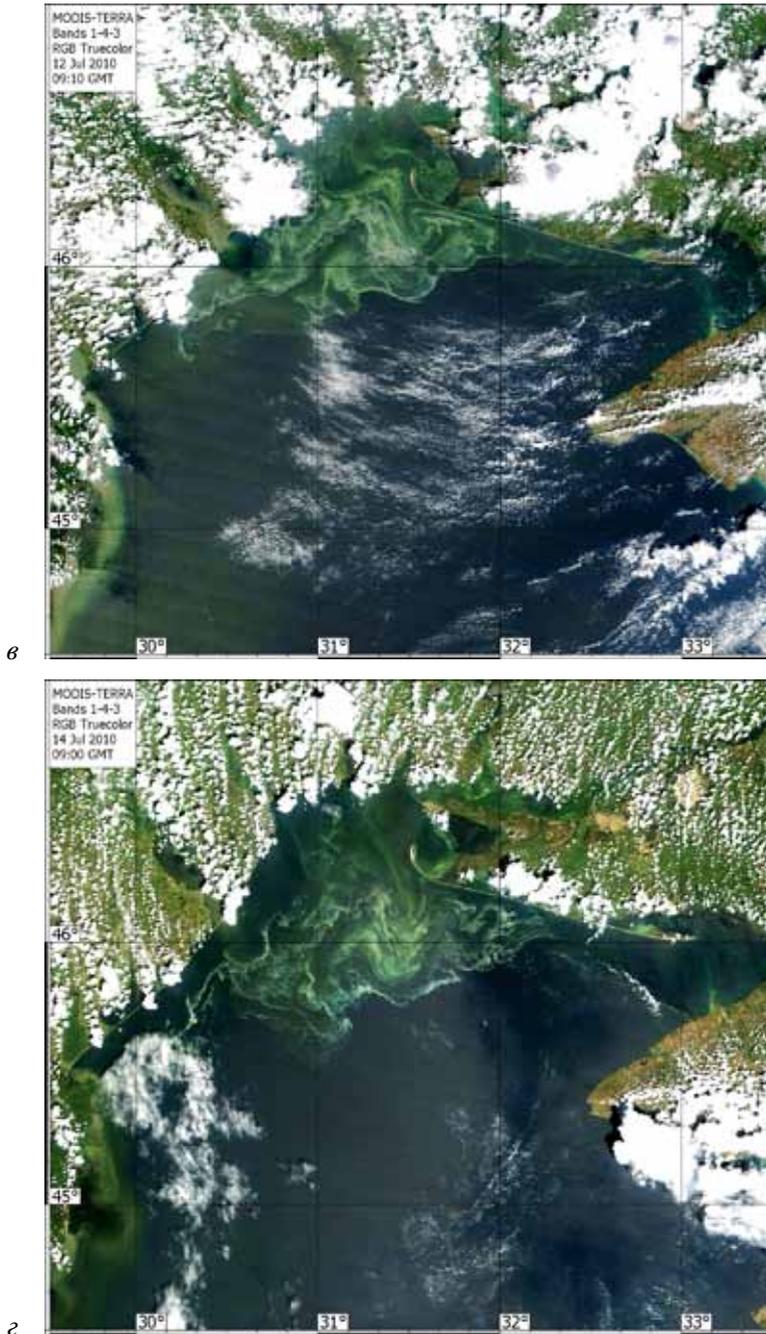


Рис. 5.41а, б. Аномальное цветение водорослей в северо-западной части Черного моря в июле 2010 г. Цветосинтезированные изображения (каналы 1-й, 4-й и 3-й) сенсора MODIS Terra получены с разрешением 250 м: а — 12.07.2009 г. в 09:10 UTC; б — 14.07.2009 г. в 09:00 UTC. Изображения любезно предоставлены Соловьевым Д. М. (МГИ НАНУ)

На спутниковом изображении от 12.07.2010 г. (рис. 5.41*в*, см. с. 313) видна характерная вихревая структура цветения воды, которая примыкает к побережью Одессы в районе Фонтана. В этот период визуально регистрировались полосы пятен беловато-буроватого цвета, которые примыкали к линии уреза воды одесских пляжей. По состоянию на 14 июля (рис 5.41*г*, см. с. 313) область цветения воды располагалась на удалении от западного побережья и охватывала всю центральную часть СЗЧМ.

Цветение фитопланктона определяется температурой воды, освещенностью и концентрацией биогенных веществ; концентрации азота и фосфора, в частности, являются лимитирующими для этого явления. Солёность вод в период цветения составляла 14,2 ‰. Температура воды менялась в пределах 24,7–25,0 °С. В области относительно чистых вод концентрация кислорода была слегка повышенной 9,67 мг/л, а насыщение их кислородом составляло 126,7 %. Концентрация фосфатов в пятнах цветения не превышала 3,9 мкг/л, а в относительно чистых водах достигала 7,5 мкг/л, что свидетельствует о потреблении фосфатов в местах концентрации фитопланктона.

Цветение вод, вызванное массовым развитием планктонных организмов в одесском регионе, регистрируется довольно часто, но до сих пор практически всегда характеризовалось мозаичностью распространения и охватывало небольшие площади. Цветение воды такого масштаба было зарегистрировано впервые. Увеличение стока речных вод в весенний период, аварийные ситуации на глубоководных выпусках СБО «Северная» и «Южная» Одессы в конце мая 2010 г. увеличили количество биогенных веществ в морской среде, достаточное количество света и оптимальный температурный режим воды создали благоприятные условия для цветения планктона



Рис. 5.42*а*. Проявление грифонов в Южном Каспии на спутниковых изображениях: фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного на НН-поляризации 25.05.2011 г. в 06:59 UTC с разрешением в точке 75 м

такого масштаба в СЗЧМ. Отклонения в атмосферных осадках — за трехдневный период 9, 10 и 12 июня, по данным ГМЦ Черного и Азовского морей, количество осадков более чем в 2 раза превысило многолетнюю норму для июля, составляющую 41,4 мм — послужили дополнительным фактором интенсификации цветения планктона. Такой случай цветения воды и его масштабы является новым явлением в состоянии экосистемы СЗЧМ, что требует дальнейшего проведения специального мониторинга. Данные спутниковых наблюдений помогли выявить крупномасштабный характер процесса, который продолжался до конца июля.

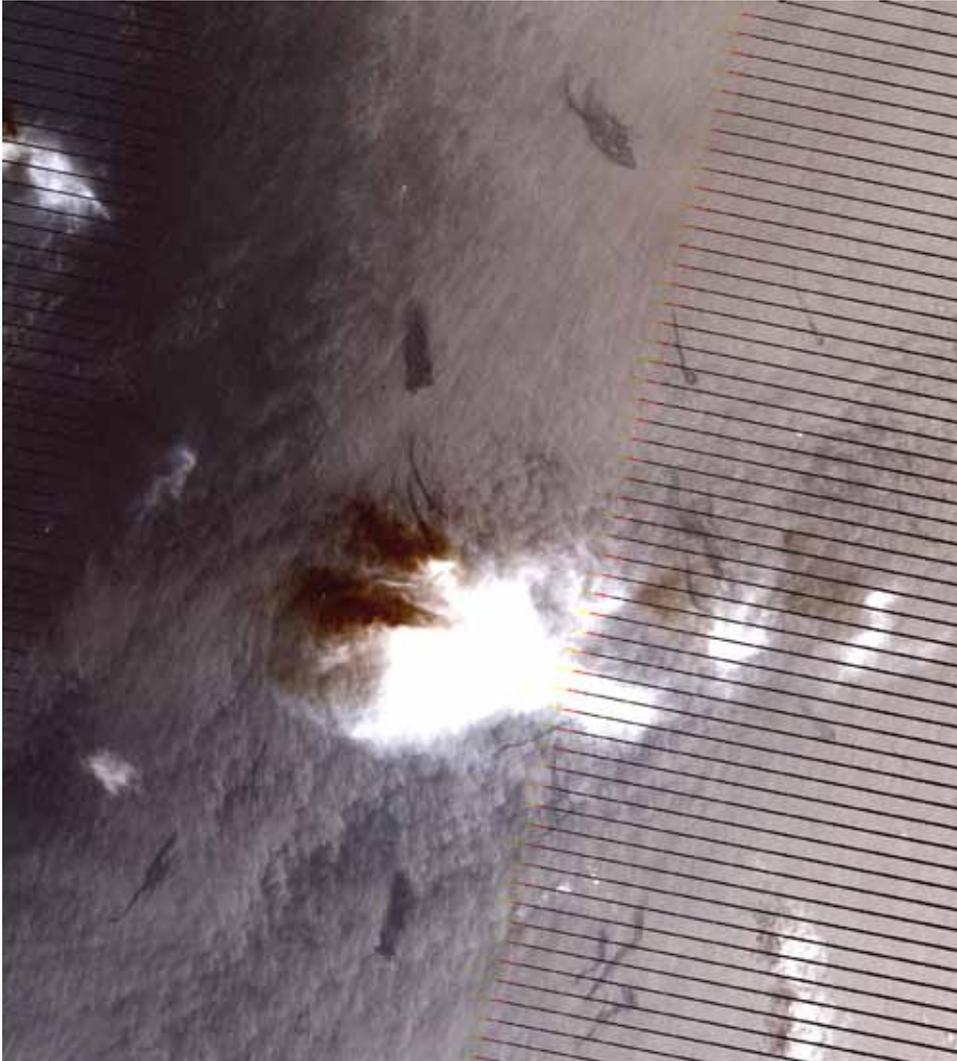


Рис. 5.42б. Проявление грифонов в Южном Каспии на спутниковых изображениях: фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 3-й, 2-й, 1-й) ЕТМ+ Landsat-7, полученного 28.05.2011 г. в 07:13 UTC с разрешением 30 м

Каспийское море

Поверхностные проявления грязевого вулканизма или так называемые естественные грифоны в Каспийском море известны давно. Им посвящено достаточно много научных работ, подробный анализ их проявлений на радиолокационных снимках дается в работе (Иванов и др., 2007).

При проведении мониторинга акватории Южного Каспия за 2009 г. – июнь 2011 г. 15 спутниковых изображений показали поверхностные проявления этого явления. Была предпринята попытка связать проявляемость грифонов на РЛИ с числом и магнитудой землетрясений в Южном Каспии и прилегающих районах. Информация о землетрясениях с магнитудой более 4 была получена из национального центра информации землетрясений USGS National Earthquake Information Center (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/>). Сведения о менее сильных землетрясениях (с магнитудой 3–4) бралась из средств массовой информации (<http://news.day.az/tag/ex3138-zemletryaseniya/4/>). Четкой связи между землетрясениями магнитудой свыше 4 и усилением грифонной активности не было обнаружено. В то же время прослеживалась достаточно высокая корреляция между проявлениями грифонов на спутниковых изображениях и землетрясениями магнитудой 3–4.

28 мая 2011 г. грифоны были зафиксированы как на РЛИ ASAR Envisat, так и на оптическом изображении ETM+ Landsat-7. По сообщению Республиканского центра сейсмологической службы НАНА, 27 мая 2011 г. в 04:55 на дне Каспия в 166 километрах от Баку на глубине 45 км было зарегистрировано землетрясение, магнитуда подземных толчков которого составила 3,9. Землетрясение магнитудой 3,2 было зафиксировано и 23 мая 2011 г. На рис. 5.42 приведены примеры проявления грифонов на РЛИ ASAR Envisat (рис. 5.42а, см. с. 314) и цветосинтезированном изображении (каналы 3-й, 2-й, 1-й) ETM+ Landsat-7 (рис. 5.42б, см. с. 315).

5.3.6. Мониторинг ледяного покрова

Спутниковый мониторинг ледяного покрова проводился зимами 2009/2010 и 2010/2011 гг. в Балтийском, Азовском морях и северной части Каспийского моря. Зима 2009/2010 гг. была необычайно холодной и ранней, уже в конце декабря замерзли практически все заливы Балтийского моря, а в феврале возникли серьезные проблемы с судоходством в этих районах. Паромное сообщение между Швецией, Финляндией и Эстонией было нарушено. Лед держался в заливах (Рижском, Куршском, Калининградском) до конца апреля 2010 г., а северной части Ботнического залива сохранялся до двадцатых чисел мая. Зима 2010/2011 г. была также ранняя, уже в конце ноября на РЛИ отмечались проявления ледяного покрова и лед сохранялся до начала мая и в Рижском, и в Финском заливах.

Впервые ледостойкая нефтедобывающая платформа Д-6, расположенная в юго-восточной части Балтийского моря, оказалась во льдах, чего ни разу не наблюдалось во время проведения авторами описанного выше мониторинга в 2004/2005 г. (см. гл. 3). На рис. 5.43 (см. с. 317) приведены РЛИ (а) и карта ледяного покрова (б) на 9 февраля 2010 г. Хорошо виден лед вокруг платформы Д-6.

Определенные по РЛИ границы льда и его классификация сравнивались с ледовыми картами, выставляемыми Шведским метеорологическим и гидрологическим

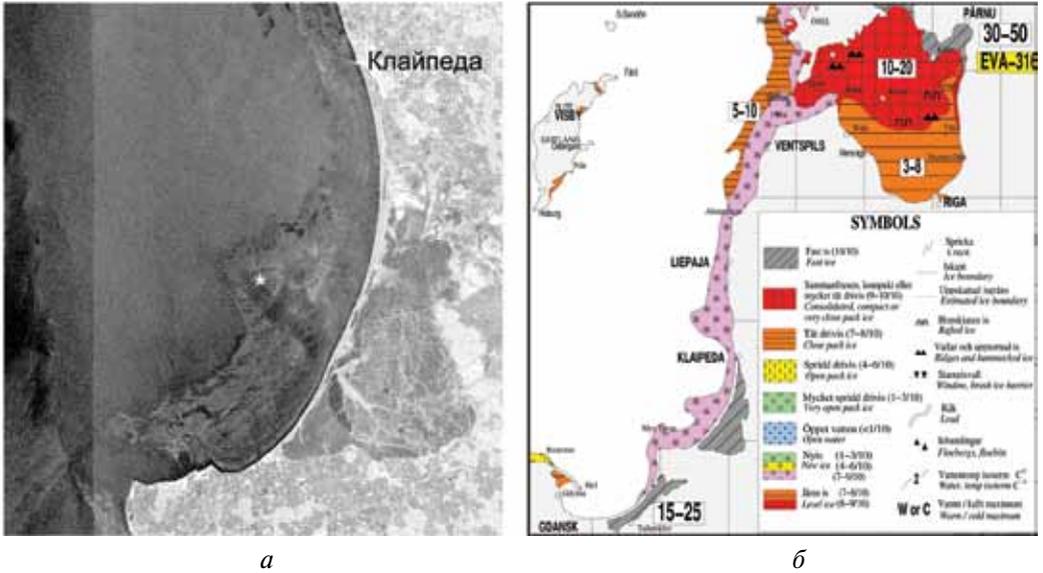


Рис. 5.43. Ледовая обстановка в районе ледостойкой нефтедобывающей платформы Д-6 09.02.2010 г.: *а* — фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 09.02.2010 г. в 08:54 UTC с разрешением в точке 75 м. Звездочкой отмечена платформа Д-6; *б* — карта ледяного покрова юго-восточной части Балтийского моря на данное число (<http://www.smhi.se>)



Рис. 5.44. Вынос льда Вислой. Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного на HH-поляризации 27.01.2010 г. в 09:05 UTC с разрешением в точке 75 м

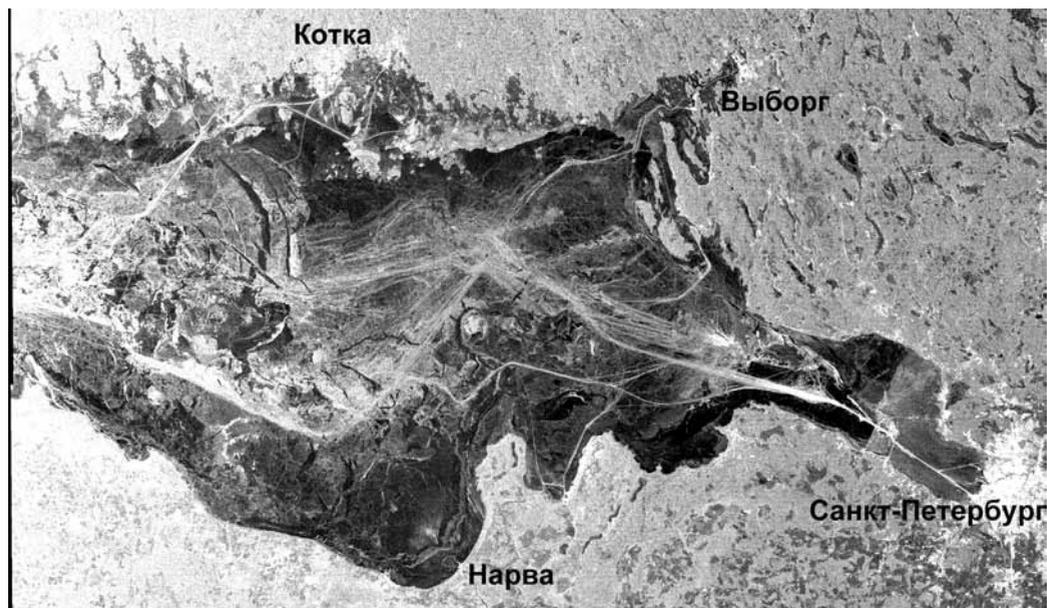


Рис. 5.45. Корабельные следы во льдах в Финском заливе. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного на НН-поляризации 17.02.2010 г. в 19:31 UTC с разрешением в точке 75 м

институтом (SMHI) на сайте http://www.smhi.sv.d./oceanografi/iceservice/is_prod_en.php. Это дало возможность продвинуться в вопросе классификации льдов на РЛИ.

Благодаря наличию ледяного покрова удалось пронаблюдать три интересных явления: вихревые структуры, проявляющиеся за счет льда (см. рис. 5.25б), вынос льда с пресными водами из Вислы и Даугавы (рис. 5.44, см. с. 317), а также ярко белые корабельные следы, которые четко прочерчивают судовые трассы, что позволяет проводить мониторинг их состояния и своевременно предоставлять информацию о возможных проблемах (рис. 5.45).

5.4. ВЫВОДЫ

При проведении ежедневного оперативного спутникового мониторинга над акваториями Черного, Балтийского и Каспийского морей, начиная с 2009 г., получено огромное количество РЛИ морской поверхности. Практически ко всем из них была подобрана сопутствующая информация: данные оптических и ИК-сенсоров, метеостанций и, по возможности, подспутниковых измерений. Огромный массив данных требует тщательной совместной обработки и осмысления. Предварительный анализ позволил уже на настоящем этапе выявить и детально изучить внутренние волны в бесприливных морях, определить районы наиболее частых поверхностных проявлений, высказать предположения об источниках их генерации. Вторая важная задача, которая решалась на основе данных спутникового мониторинга, — исследование

мелкомасштабных вихревых структур и их тонкой пространственной структуры за счет «сликового» механизма проявления на РЛИ. Третья, традиционная задача, это выявление антропогенных загрязнений морской поверхности и сравнение современного состояния с предыдущими годами. Впервые коллективом специалистов ИКИ РАН начата работа по мониторингу ледяного покрова в Балтийском, Азовском морях и в северной части Каспийского моря.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00831-а и 10-05-00428-а). Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов С1Р.6342, С1Р.5004, АОВЕ 2775 и С1Р.1027.

Глава 6

ДИНАМИКА ВОД ЧЕРНОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

ВВЕДЕНИЕ

Черное и Каспийское моря — внутренние бассейны, каждый из них омывает берега нескольких государств и имеет важное народнохозяйственное значение. С другой стороны, эти моря с ограниченным (отсутствующим в случае Каспия) водообменом и открытыми акваториями подвержены интенсивному антропогенному загрязнению, обусловленному стоком рек, отходами курортных зон и промышленных центров на берегу, добычей и транспортировкой нефти и т.д., что может приводить к изменениям на экосистемном уровне. Поэтому задачи контроля экологического состояния морей и возможности оперативной оценки вероятных путей распространения загрязнений в определенной ситуации диктуют необходимость исследования физических процессов, определяющих горизонтальный водообмен, в том числе между шельфом и глубоководными районами.

Огромные возможности для такого исследования открывают спутниковые методы, дающие наглядную картину динамики вод. Использование спутниковой информации, наряду с традиционными гидрологическими съемками, особенно важно теперь, когда выходы научно-исследовательских судов в море по экономическим соображениям проходят эпизодически, а гидрологические работы чаще всего ограничены только небольшой акваторией России. Последовательные спутниковые изображения с высоким пространственно-временным разрешением и одновременным охватом всей исследуемой акватории позволяют проследить эволюцию обнаруженного элемента циркуляции вод, при наличии контрастов в поле температуры, содержании взвеси/хлорофилла или аномалии уровня и (в первых трех случаях) при отсутствии облачности. Кроме того, очень важна, ввиду ограниченности экспедиционного времени, возможность наведения научно-исследовательского судна на выбранный при анализе оперативной спутниковой информации объект исследования (например, мезомасштабный вихрь или вихревой диполь).

В арсенале дистанционных средств зондирования поверхности Черного моря, использовавшихся, например, в Лаборатории экспериментальной физики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) в течение последних примерно 20 лет, были спутниковые изображения ИК- и оптического диапазонов спектра (AVHRR радиометры спутников NOAA, сенсор SeaWiFS и спектрорадиометры

MODIS) с относительно высоким пространственно-временным разрешением (250 м — 1 км и 1 сут), получаемые и обрабатываемые в Морском гидрофизическом институте Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ, Севастополь), доступные через Интернет альтиметрические измерения со спутников TOPEX/Poseidon (6,5 км и 10 сут) и ERS 1, 2 (7,5 км и 35 сут), данные дрейфтеров поверхностного слоя системы Argos со спутниковым определением координат, а также спутниковые фотографии высокого пространственного разрешения (метры — десятки метров). Спутниковые изображения также являются необходимым инструментом исследования динамики вод Каспийского моря.

В настоящее время в Черном и Каспийском морях различают крупномасштабную, мезомасштабную и мелкомасштабную циркуляции вод. К крупномасштабной циркуляции вод в Черном море относятся: Основное черноморское течение, западный и восточный циклонические круговороты, в Каспийском море — круговороты в Среднем и Южном Каспии. К мезомасштабным элементам циркуляции относят: антициклонические и циклонические вихри, вихревые диполи и струи с горизонтальным размером ~20–100 км, превышающим бароклинный радиус деформации Россби R_d (для Черного моря $R_d \approx 15$ –20 км в открытом море (Журбас и др., 2004) и около 12 км в прибрежной зоне северо-западного шельфа (Ginzburg et al., 2000), для Каспийского — 17–22 км в глубоководных районах и 3–8 км на шельфе в восточной части Среднего Каспия (Архипкин и др., 1992)). К мелкомасштабным — циклонические и антициклонические вихри и диполи с диаметрами (размерами) менее R_d . Основные результаты исследования мезомасштабной динамики вод Черного и Каспийского морей, ее связи с крупномасштабной циркуляцией вод, ветровым воздействием и неоднородностями линии берега/донной топографии, полученные главным образом на основе анализа доступных спутниковых изображений ИК- и видимого диапазонов спектра, изложены в последующих разделах.

6.1. ЧЕРНОЕ МОРЕ

Основными элементами крупномасштабной циркуляции вод Черного моря являются распространяющееся по периферии моря в циклоническом направлении Основное черноморское течение (ОЧТ) со стрежнем, расположенным в среднем над континентальным склоном, а также западный и восточный циклонические круговороты. Эти элементы крупномасштабной циркуляции и (в общих чертах) мезомасштабной динамики были выявлены еще до начала широкого использования спутниковой информации, на основе гидрологических измерений/съемок, и нашли отражение на известных схемах циркуляции поверхностных вод Черного моря (Блатов и др., 1984; Овчинников, Титов, 1990; Oguz et al., 1993). Внедрение в практику черноморских исследований спутниковой информации значительно расширило понимание авторов особенностей мезомасштабной циркуляции Черного моря и сделало очевидным тот факт, что синоптическая картина течений в его поверхностном слое значительно сложнее, чем это следует из вышеупомянутых схем общей циркуляции.

Анализ спутниковой информации и комплексные исследования на основе оперативного использования спутниковых данных и гидрологических съемок с

мезомасштабным пространственным разрешением дали представления о пространственно-временных и кинематических характеристиках мезомасштабных структур, местах их наиболее частого образования и эволюции, факторах, способствующих их образованию, об их влиянии на структуру ОЧТ и роли в горизонтальном и вертикальном водообмене в деятельном слое Черного моря. Основные результаты исследований мезомасштабной динамики Черного моря российскими и зарубежными учеными, полученные на основе спутниковой информации, изложены в десятках работ (см., например (*Sur et al.*, 1994, 1996; *Гинзбург*, 1994; *Sur, Piyin*, 1997; *Ginzburg et al.*, 2000, 2008b; *Sokolova et al.*, 2001; *Zatsepin et al.*, 2002, 2003; *Гинзбург* и др., 2003, 2008; *Poulain et al.*, 2005)). Ниже приведены некоторые примеры результатов таких исследований, полученных в основном в ИО РАН. Затронут также вопрос о мелкомасштабных вихрях Черного моря, обнаруживаемых на снимках из космоса с высоким пространственным разрешением.

6.1.1. Мезомасштабная динамика вод

Прибрежные антициклонические вихри наблюдаются вдоль всего периметра Черного моря (рис. 6.1, 6.2, см. с. 323). Однако, как показывает анализ последовательных спутниковых изображений, эти вихри не являются стационарными или квазистационарными, «привязанными» к определенному району. Они перемещаются из мест своего зарождения в направлении распространения ОЧТ. В этом смысле географические названия Севастопольский, Крымский, Кавказский, Батумский и др., данные в работе (*Oguz et al.*, 1993) вихрям по географическим районам их обнаружения и часто используемые в литературе, не вполне согласуются с реальной вихревой динамикой. Например, антициклоны, образовавшиеся к юго-западу от Севастополя, движутся над пологим северо-западным склоном иногда до $42^{\circ}30'$ с.ш. Пример того, что так называемые Калиакрский и Босфорский вихри могут представлять одну и ту же структуру, зарегистрированную в разные моменты времени, показан на рис. 6.3 (см. с. 324) (отметим необычно высокую положительную разность температуры между центром антициклона и окружающими водами, достигавшую в январе 2001 г. почти 3°C). Аналогично антициклон, сформировавшийся у северо-восточного побережья Кавказа (Кавказский в соответствии с (*Oguz et al.*, 1993)), может оказаться на месте Крымского, а Крымский переместиться в район Севастополя (рис. 6.4, см. с. 325).

Кроме того, региональная мезомасштабная динамика, связанная с формированием и перемещением вихрей, характеризуется весьма заметной пространственно-временной изменчивостью. Например, над северо-западным континентальным склоном могут существовать одновременно два или три антициклонических вихря с диаметрами 50–90 км, распространяющихся на юго-запад (см. рис. 6.1, 6.2, 6.3a); два или три антициклона могут одновременно наблюдаться у кавказского побережья (см. рис. 6.1). Сильная мезомасштабная изменчивость (межгодовая, сезонная, синоптическая) характерна и для юго-восточного района моря. Например, один и два крупных антициклона (60–90 км в диаметре), относящиеся к теплому сезону (июнь и май), различимы на рис. 6.1 и 6.2 соответственно, в то время как на рис. 6.5 (см. с. 326) (декабрь) — два антициклона с диаметрами примерно 50 км, образующие дипольные структуры, и еще по крайней мере два меньшего размера.

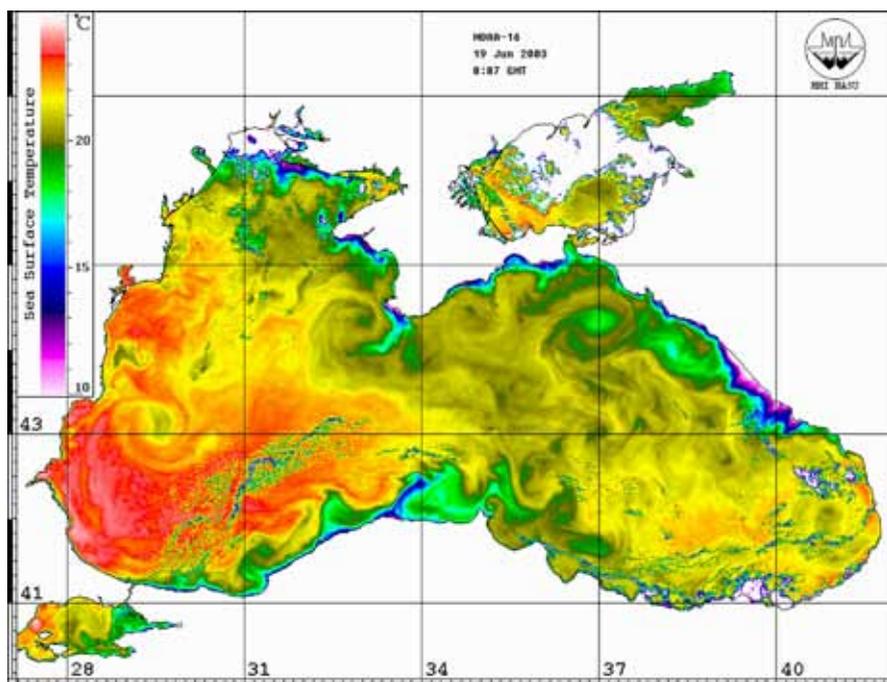


Рис. 6.1. ИК-изображение Черного моря, полученное со спутника NOAA-16 19 июня 2003 г.

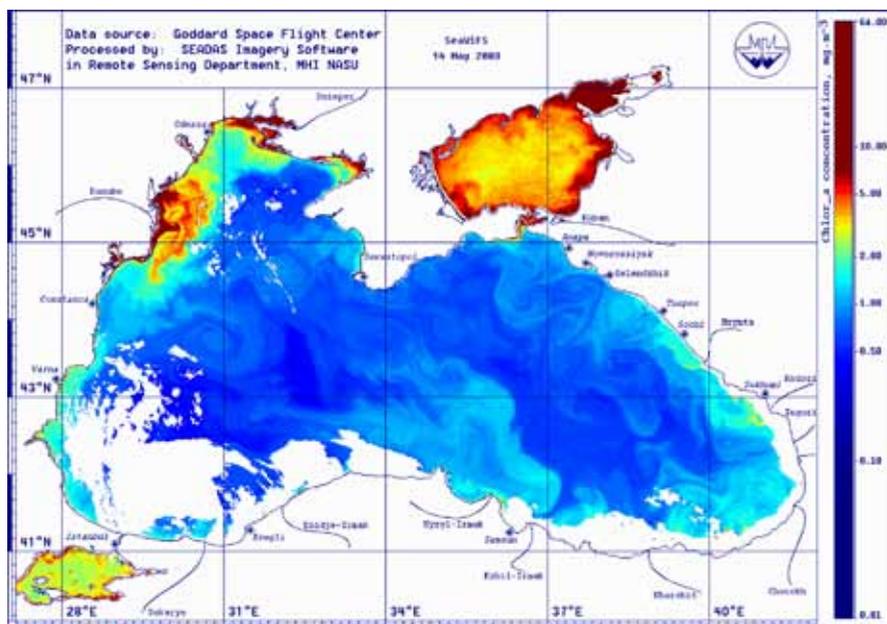
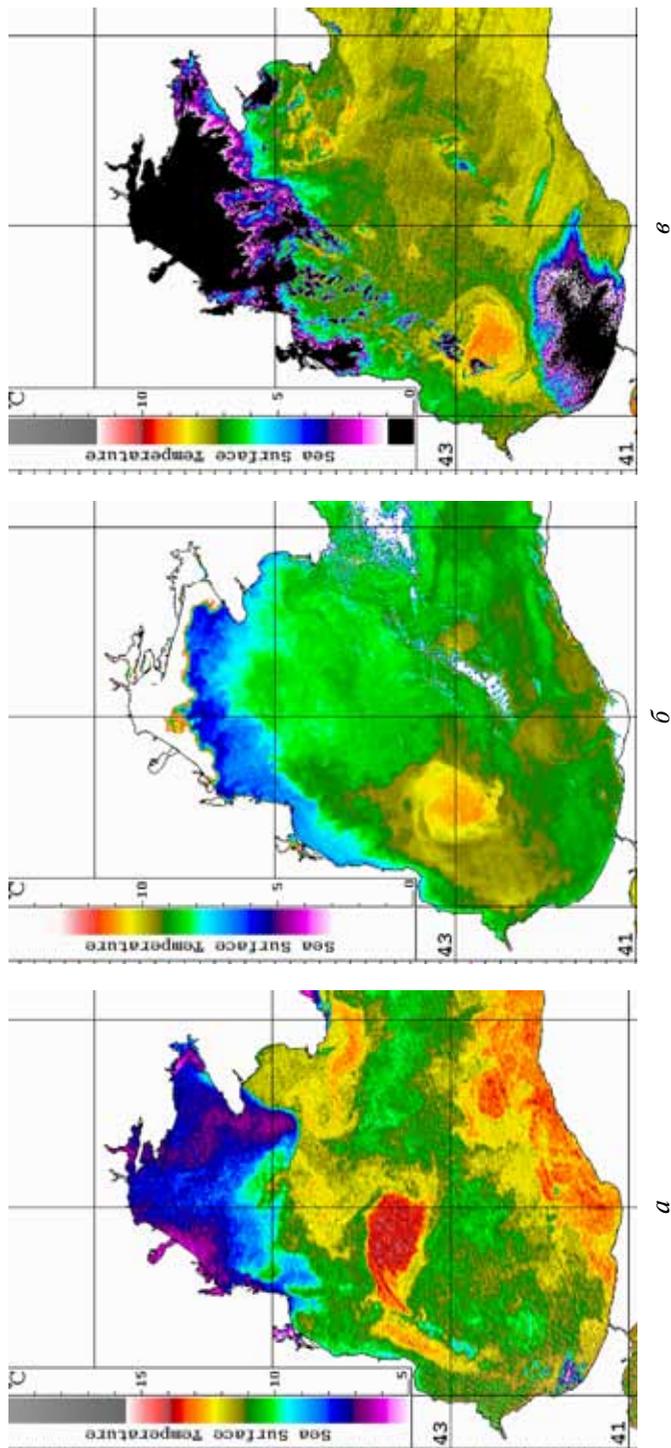
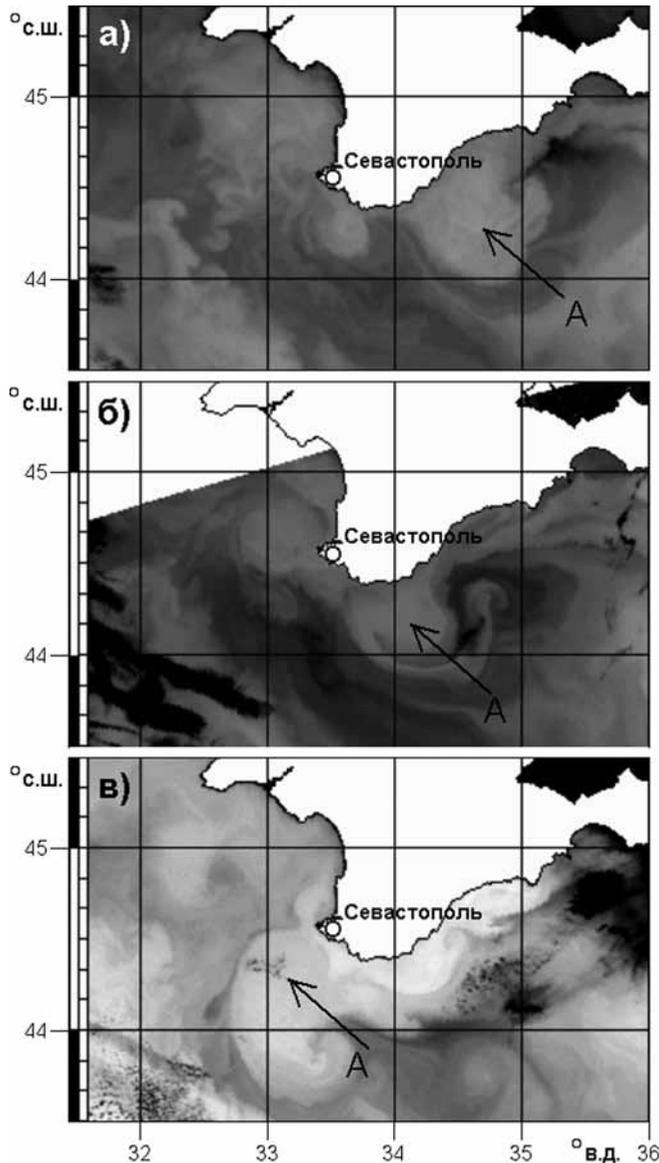


Рис. 6.2. Изображение, полученное радиометром SeaWiFS 14 мая 2003 г.



Р и с . 6.3. Фрагменты ИК-изображений, полученных со спутника NOAA-14 в 2001 г.:

а — 8 января; б — 16 февраля; в — 9 марта



Р и с . 6.4. Фрагменты ИК-изображений, полученных со спутника NOAA-3 в 2004 г.:
а — 3 октября; *б* — 5 октября; *в* — 15 октября; А — антициклонический вихрь

Механизмы образования прибрежных антициклонов и их сезонная изменчивость в разных регионах еще недостаточно изучены. Например, в качестве факторов, определяющих образование антициклонического вихря в юго-восточной части моря, разными авторами рассматривались антициклоническая завихренность поля ветра, превышение осадков над испарением, замедление распространяющихся по периметру моря топографических волн в данном районе и слияние нескольких вихрей

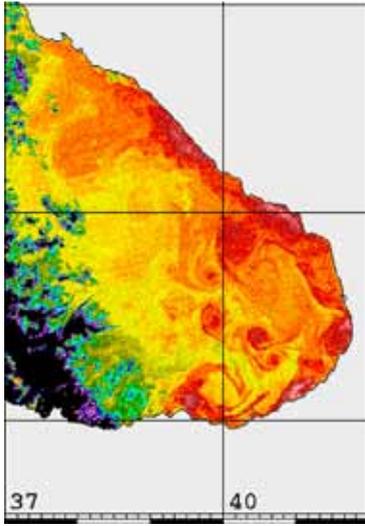


Рис. 6.5. Фрагмент ИК-изображения, полученного со спутника NOAA-14 12 февраля 1999 г.

(Ginzburg et al., 2008b; Гинзбург и др., 2008a). Согласно результатам ассимиляции альтиметрических измерений в модели циркуляции Черного моря в работе Г.К. Коротаева и др. (2002) (Ginzburg et al., 2008b; Гинзбург и др., 2008a), антициклонический вихрь здесь формируется, в основном, в марте и существует до конца октября – начала ноября. Однако, как показывает анализ изображений ИК- и видимого диапазонов спектра, антициклоны (один или несколько) наблюдаются во все сезоны. Возможно, что в осенне-зимний сезон их диаметр и интенсивность уменьшаются и такие вихри не обнаруживаются альтиметрическими измерениями (Гинзбург и др., 2003).

Важным результатом спутникового мониторинга мезомасштабной динамики Черного моря стало установление факта, что мезомасштабные антициклонические вихри могут быть типичным элементом циркуляции в восточной части открытого моря, по крайней мере в теплый сезон (апрель–декабрь). Их появление здесь обусловле-

но отделением прибрежных антициклонов от континентального склона, а дальнейшая эволюция определяется взаимодействием с соседними вихрями и ОЧТ. Эволюция таких антициклонов открытого моря, практически с момента их отделения от побережья до приближения вновь к прибрежной зоне и прекращения существования (или до невозможности дальнейшего наблюдения из-за облачности или слабых кон-

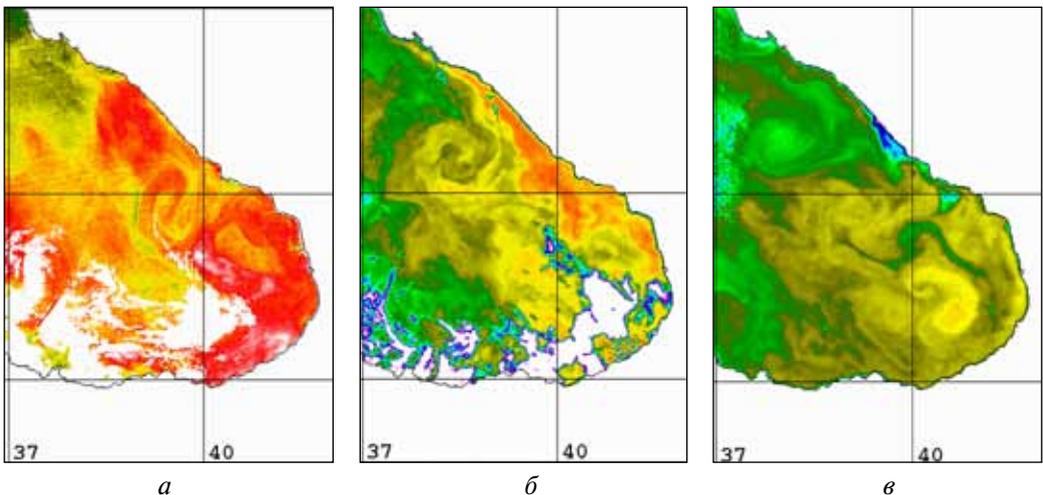


Рис. 6.6. Перемещение антициклонического вихря в восточной части моря летом-осенью 2007 г. — фрагменты ИК-изображений, полученных со спектро радиометра MODIS Aqua: а — 31 июля; б — 30 сентября; в — 19 октября

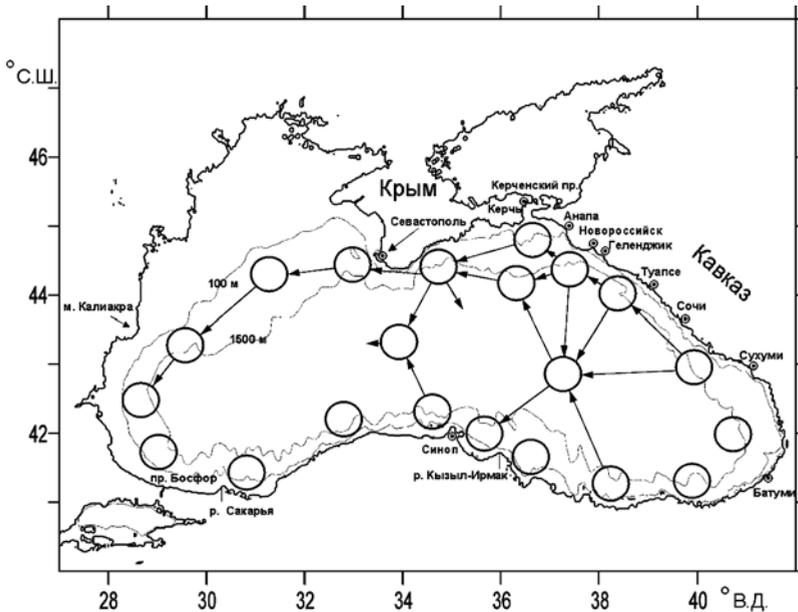


Рис. 6.7. Места наиболее частого наблюдения антициклонических вихрей в Черном море (круги) и траектории их перемещения (линии со стрелками). Контурные линии — изобаты 100 и 1500 м

трастов трассера), прослежена по последовательности спутниковых изображений для нескольких лет. В 1993 г. такой вихрь наблюдался по крайней мере в течение 5 мес, в 1997 г. — 1 мес, в 1998 и 1999 гг. — примерно 8 мес (Zatsepin et al., 2003; Ginzburg et al., 2008; Гинзбург и др., 2008). Пример продвижения на запад-северо-запад на протяжении примерно 2,5 мес антициклонического вихря, отделившегося от побережья в районе Сочи в июле 2007 г., показан на рис. 6.6 (см. с. 326).

Пути перемещения антициклонических вихрей на протяжении их жизненного цикла различны. Например, в 1998 г. антициклон отделился от Анатолийского побережья в январе и слился с отделившимся от побережья вихрем того же направления вращения в районе Новороссийска в сентябре. В 1999 г. антициклон образовался как прибрежный в районе Сухуми в апреле и слился с другим антициклоном у Анатолийского побережья в декабре. Жизненный цикл вихря в 1999 г., его термохалинная структура, влияние на структуру ОЧТ, распределение гидробиологических и гидрохимических параметров были предметом детального исследования на основе спутниковой информации и мультимедийной съемки со спутниковой привязкой, включая использование дрейфтеров (Zatsepin et al., 2003). Перемещение прибрежных антициклонов вдоль периферии моря в циклоническом направлении, места их отделения от побережья, а также траектории движения образовавшихся таким образом вихрей открытого моря на протяжении их жизненного цикла, установленные наблюдениями (в основном спутниковыми), схематически представлены на рис. 6.7. Заметим, что крупные антициклоны (с диаметром порядка 80–90 км) хорошо проявляются на картах аномалий уровня (например, рис. 6.8, см. с. 328).

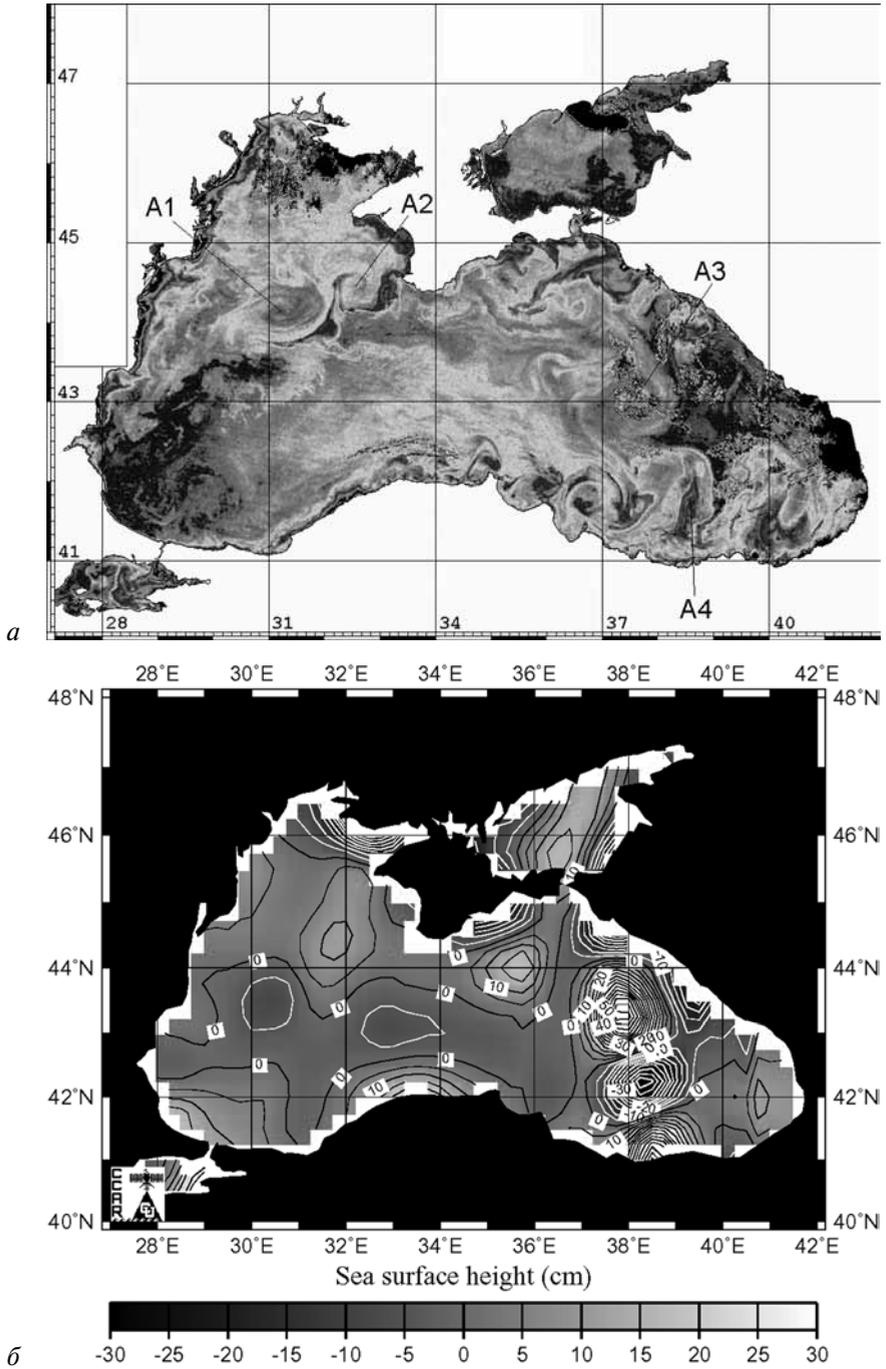


Рис. 6.8. ИК-изображение, полученное со спутника NOAA-14 29 июня 1998 г. (а), и соответствующая ему карта аномалий уровня моря по альтиметрическим данным TOPEX/Poseidon и ERS-2 29 июня 1998 г. (б) (Гинзбург и др., 2003). А — антициклонические вихри

Схема на рис. 6.7 отражает часто наблюдаемое отделение антициклонов от побережья в восточной части моря вблизи Новороссийска, Туапсе и Сочи-Сухуми у кавказского побережья, от юго-восточного побережья Крыма и от Анатолийского побережья, т. е. на участках с резко меняющимся направлением изобат или вблизи мысов. Глубоководные антициклонические вихри наиболее часто обнаруживаются в двух районах — с центрами примерно на 43° с. ш., $37\text{--}39^\circ$ в. д. и 44° с. ш., $35\text{--}37^\circ$ в. д., причем в первом случае их источником являются антициклоны, отделившиеся от побережья в районе Сухуми (Гудаутской отмели) или от Анатолийского побережья, во втором — антициклоны, отделившиеся от побережья в районе Новороссийска-Геленджика и от юго-восточного побережья Крыма.

Наблюдения долгоживущих глубоководных антициклонов в западном бассейне Черного моря практически отсутствуют. В типичной ситуации антициклоны, сформировавшиеся к юго-западу от Севастополя или пришедшие сюда из восточного бассейна, распространяются вдоль пологого континентального склона, не переходя в глубоководную часть моря, причем время их жизни на склоне может достигать 5 месяцев. Данную асимметрию в интенсивности мезомасштабной динамики в западном и восточном глубоководных бассейнах Черного моря могут объяснить результаты лабораторного эксперимента, описанного в работе (Zatsepin et al., 2005), в соответствии с которыми структура и динамика вдольберегового течения сильно зависят от безразмерной ширины зоны континентального склона L_s/R_d , где L_s — кратчайшее (для каждой точки) расстояние между изобатами 100 и 1500 м. При $L_s/R_d \leq 1$ (узкий и крутой континентальный склон, как у восточного побережья Черного моря) влияние наклонного дна на стабильность вдольберегового течения с шириной $(2\text{--}4)R_d$ (как у ОЧТ) ничтожно; в этом случае при прекращении или ослаблении ветрового воздействия течение начинает меандрировать и образуются прибрежные вихри. При $L_s/R_d \geq 2$ (широкий и пологий склон, в северо-западной части моря $L_s/R_d \geq 4$) неустойчивость потока слабо выражена и вихри не образуются.

Сезонные и межгодовые различия в интенсивности образования глубоководных антициклонов в восточной части моря определяются изменчивостью интенсивности ОЧТ, которая, в свою очередь, зависит от интенсивности ветрового воздействия. Гидрологическими съемками и спутниковыми наблюдениями (Zatsepin et al., 2002; Гинзбург и др., 2003) установлено, например, что в 1998, 1999 и 2001 гг., в отсутствие интенсивной циклонической циркуляции в масштабах всего моря и при бароклинно неустойчивом ОЧТ, антициклоны открытого моря здесь наблюдались в осенний период, однако они отсутствовали в тот же период в 2000 г., при интенсивном ОЧТ и хорошо выраженных западном и восточном циклонических круговоротах. Следует отметить, что большая часть наблюдений отделения прибрежных вихрей и их трансформации в глубоководные антициклоны относится к теплому сезону (апрель-декабрь), когда крупномасштабная циркуляция в море менее интенсивна и скорость ветра в атмосфере ниже, чем зимой. Однако, судя по отдельным спутниковым изображениям и альтиметрическим данным, отделение антициклонов от кавказского и турецкого побережий может иметь место и зимой (например, рис. 6.5). Возможно, такие события связаны с локальными синоптическими ветровыми воздействиями. Этот вопрос требует дальнейших исследований на основе комплексного анализа синхронных спутниковых наблюдений, гидрологических съемок и данных о синоптической изменчивости поля ветра. На рис. 6.9 (см. с. 330) показано, что переход от

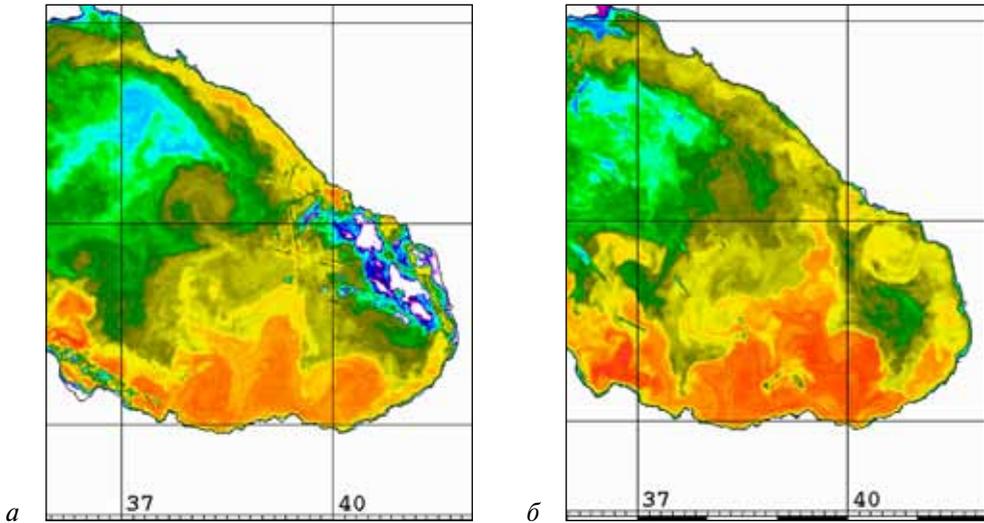


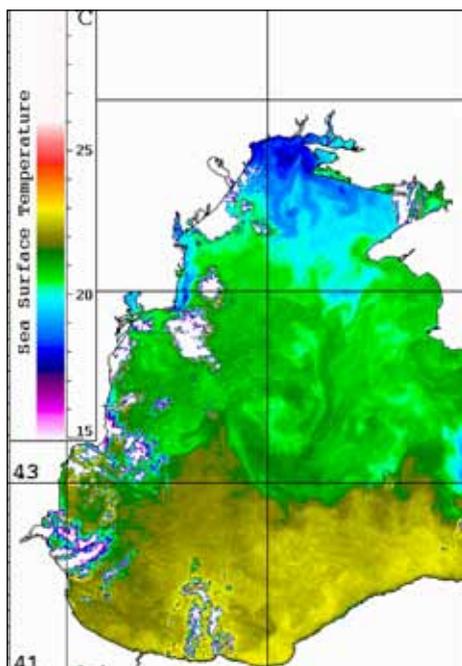
Рис. 6.9. Фрагменты ИК-изображений, полученных со спутника NOAA-12 в 2004 г.:
а — 18 декабря; б — 29 декабря

узкой и интенсивной струи прибрежного течения в районе Анапы-Туапсе к намечающемуся меандрированию потока может происходить в течение недели.

Мезомасштабные вихри являются мощным механизмом горизонтального водообмена как в пределах шельфа, так и между прибрежной зоной и открытым морем. В прибрежной зоне они обеспечивают приток более чистых глубоководных вод к берегу в своей фронтальной части и отток более загрязненных прибрежных вод в тыловой. Антициклоны переносят более теплую и менее соленую прибрежную воду с содержащимися в ней примесями естественного и антропогенного происхождения из мест своего образования к местам диссипации или слияния с другими вихревыми структурами. Эволюция прибрежных антициклонов в районах с расстоянием между ОЧТ и берегом, превышающим горизонтальный масштаб вихрей, или при их отделении от побережья, сопровождается образованием на их периферии от одного до трех нестационарных присоединенных циклонических вихрей с диаметрами, меняющимися от ~10 км до соизмеримых с диаметром «материнского» антициклона (см. рис. 6.5, 6.6а, в; 6.10, 6.11, см. с. 331), и струй. Вследствие этого и вовлечения окружающих вод попеременно с разных направлений, область влияния антициклона оказывается существенно превышающей его диаметр (см. рис. 6.10, 6.11; см. также спутниковые изображения в работах (Гинзбург, 1994; Ginzburg et al., 2000)). За счет вовлечения вод по своим северным и южным перифериям антициклонические вихри над северо-западным континентальным склоном обуславливают перенос шельфовых вод с повышенной концентрацией хлорофилла-а от западного побережья в глубоководный район (в частности, к берегам Крыма) и вод от побережья Крыма (включая холодные воды апвеллинга у м. Херсонес) на юго-запад в глубоководную часть моря. Антициклонические вихри над широким северо-западным склоном являются, таким образом, поставщиками богатых биогенными веществами и хлорофиллом вод в глубоководный район.



Р и с . 6.10. Фрагмент изображения, полученного со спутника «Космос-1939» 31 июля 1993 г. (трассер — фитопланктон) (Гинзбург, 1994).



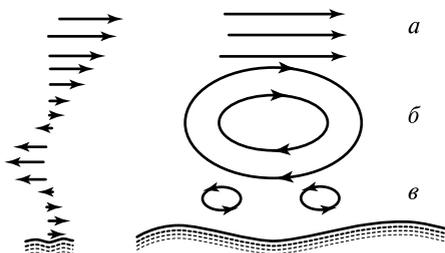
Р и с . 6.11. Фрагмент ИК-изображения, полученного со спутника NOAA-17 25 сентября 2004 г.

Вклад антициклонических вихрей, отделившихся от побережья, в водообмен между шельфом и глубоководным бассейном обусловлен вовлечением и переносом в открытое море прибрежных вод с пониженной солёностью, а также формированием присоединенных вихрей и струй на периферии антициклонов (например, крупный присоединенный циклон на южной периферии антициклонического вихря АЗ на рис. 6.8, проявившийся и на карте аномалий уровня). Отделение антициклонов от побережья приводит к отклонению ОЧТ в сторону моря, образованию больших меандров течения и его разветвлению (см. например, рис. 6.6, 6.9а).

6.1.2. Мелкомасштабные вихри

Вихри с масштабом меньше R_d редко проявляются на спутниковых ИК- и оптических изображениях, получаемых при помощи сенсоров MODIS Aqua/Terra и AVHRR NOAA, вследствие слабых тепловых или оптических контрастов, недостаточного пространственного разрешения сенсоров, а также малого времени жизни (один или несколько дней) таких вихрей. Однако они обнаруживаются на снимках с высоким пространственным разрешением (метры – десятки метров).

Механизмы образования таких вихрей, как показывает анализ доступной информации дистанционного зондирования моря, разнообразны и не всегда очевидны. В прибрежной зоне Черного моря такими механизмами могут быть (Костяной и др., 2010): ветровой импульс, сдвиговая неустойчивость прибрежных течений, речной сток, взаимодействие вихрей и их диссипация, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт). Ряд примеров мелкомасштабных циклонических и антициклонических вихрей или вихревого диполя размером 1–10 км, которые проявляются благодаря наличию вод с повышенным содержанием взвеси или ПАВ и обнаруживаются на оптических изображениях спутника QuickBird с очень высоким (0,6–2,44 м) пространственным разрешением, дан в работе (Костяной и др., 2010). Мелкомасштабные вихри в прибрежной зоне (циклонические, антициклонические или вихревые диполи) могут быть связаны также с прибрежным апвеллингом (например, циклон мористее м. Евпаторийский на рис. 6.1, циклоны восточнее бухт Коктебель и Двукорной на рис. 6.8а; см. также (Ginzburg et al., 2000)). Циклонические или антициклонические вихри с диаметром несколько километров могут формироваться между мезомасштабным вихрем и берегом — «вторичные вихри», по терминологии авторов работы (Коновалова, Лагутин, 1968). Схема образования таких вихрей, регистрировавшихся аэрофотосъемкой вдоль кавказского побережья в районе Геленджика еще до наступления спутниковой эры в океанологии, показана на рис. 6.12; см. также п. 5.3.3).



Мелкомасштабные вихри, в основном циклоны, формируются и в открытом море. Один из очевидных механизмов возникновения таких короткоживущих образований — сдвиговая неустойчивость на периферии мезомасштабных антициклонов. Пример подобных циклонов, как правило, одновременно нескольких, на периферии антициклонических вихрей показан на рис. 6.13 (периферии антициклонов А3 и А4). Единичные пока наблюдения позволяют предполагать, что такие ситуации следуют за интенсивными ветровыми воздействиями.

Одиночные мелкомасштабные вихри спиралевидной формы, в большинстве случаев циклонические, или группа (упаковка) таких вихрей в прибрежной зоне Черного моря и в его глубоководной части отчетливо проявляются на изображениях радиолокатора с синтезированной апертурой SAR ERS-2 и усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой ASAR Envisat с пространственным разрешением 25–75 м (Митягина, Лаврова, 2008; Костяной и др., 2010). На радиолокационных изображениях (РЛИ), полученных преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра, такие вихри визуализируются за счет вовлечения в орбитальное движение сликовых полос, образованных постоянно присутствующими на морской поверхности пленками ПАВ, особенно в теплое время года. Пример РЛИ с плотной упаковкой нескольких спиралевидных циклонических вихрей размером 2,5–10 км в прибрежной зоне представлен на рис. 6.14 (см. с. 334).

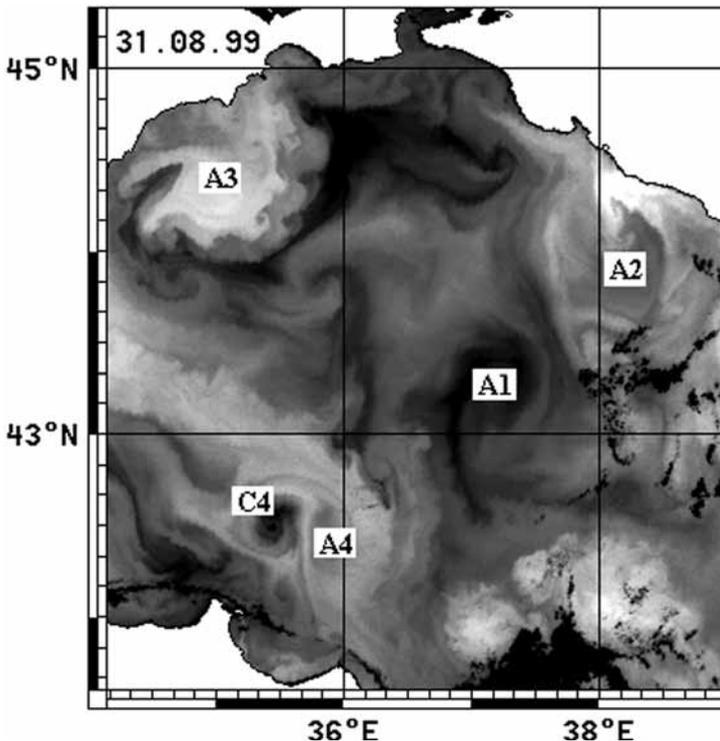


Рис. 6.13. Фрагмент ИК-изображения, полученного со спутника NOAA-14 31 августа 1999 г. (Zatsepin et al., 2003)

Подобного типа мелкомасштабные (5–25 км) спиралевидные вихри являются типичным элементом циркуляции Мирового океана, что стало очевидным благодаря наблюдениям (фотографиям) американских астронавтов с начала 1980-х гг. (см. (*Stevenson*, 1989; *Munk et al.*, 2000)). Для Черного моря известен лишь один пример такой спутниковой фотографии (рис. 6.15, см. с. 335), на которой видны четыре циклонических вихря с диаметрами примерно 15–20 км в солнечном блике: два в пределах шельфовой зоны и два — на расстоянии около 50 км от берега, т.е. в открытом море. Расстояния между светлыми полосами в вихрях (по-видимому, пленки ПАВ) — от 3 км на их перифериях до примерно 1 км в центрах (*Munk et al.*, 2000); ширина полос, очевидно, не превышает нескольких сотен метров. Как и в океане (*Stevenson*, 1998), и отчасти это видно на рис. 6.14, соседние вихри обеих пар на рис. 6.15 взаимосвязаны. Однако, в отличие от рис. 6.14, линии тока между парами на рис. 6.15 направлены в среднем параллельно берегу (этого не наблюдается к западу и северу от данной вихревой картины).

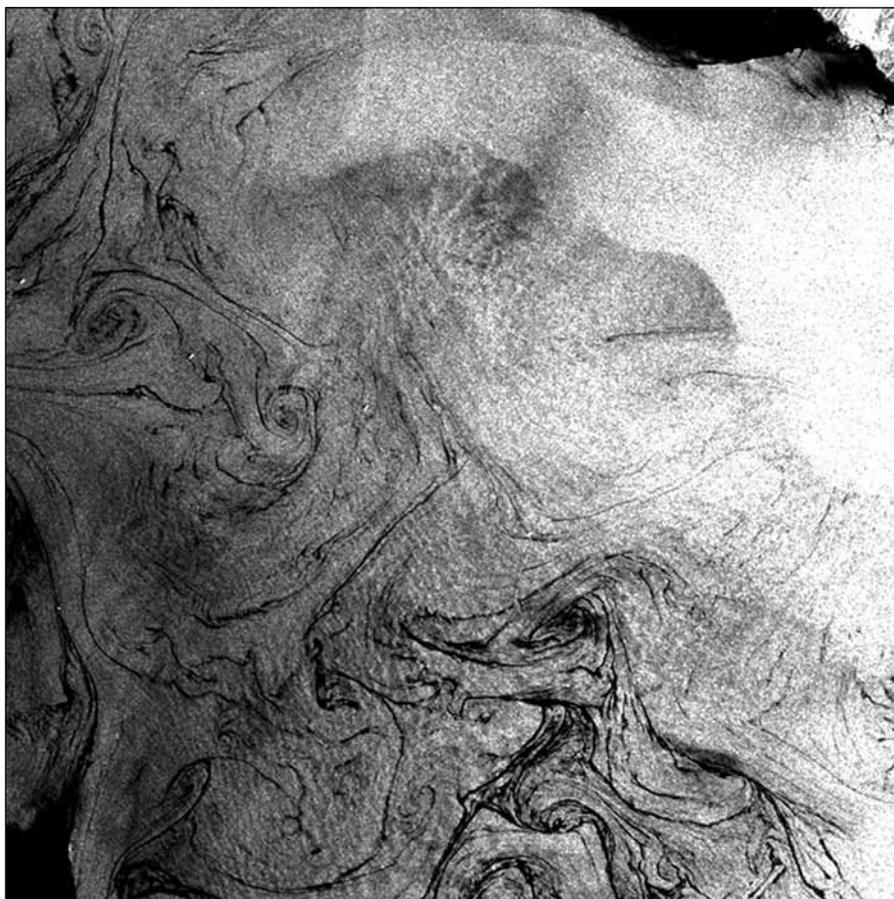


Рис. 6.14. Фрагмент РЛИ, полученного ASAR Envisat 16 февраля 2007 г. (размер кадра 50×50 км)



Р и с . 6.15. Фотография, полученная 18 сентября 1992 г. в солнечном блике при полете американского космического корабля «Шаттл» с помощью фотокамеры Hasselblad (разрешение ~50 м, снимок STS47-74-47) (Munk et al., 2000)

Интересен комментарий к данному снимку в статье (Stevenson, 1998): поле спиралевидных вихрей регистрировалось на нескольких снимках в одном и том же месте в течение трех дней, хотя отдельные вихри не могли быть идентифицированы от снимка к снимку; при этом вихри отсутствовали в близлежащем районе вблизи Босфора. Из комментария понятно, что вихревая картина на рис. 6.15 была локальной и спонтанно появившейся, ее временной масштаб составлял несколько дней, а время жизни отдельных вихрей не превышало суток.

Очевидно, какой-то локальный процесс должен был быть причиной возникновения данной вихревой ситуации. Это не сдвиг скорости на границе ОЧТ ни для вихрей на шельфе, ни для более удаленной от берега пары. Гипотетический вдольбереговой поток между двумя вихревыми парами вызвал бы разнонаправленные вращения в них. В принципе, такая картина могла бы возникнуть при распространении здесь

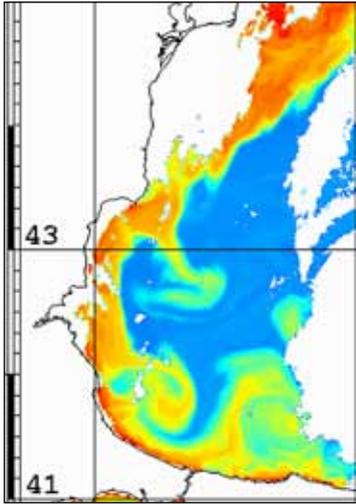


Рис. 6.16. Фрагмент изображения, полученного спектрорадиометром MODIS Aqua 25 мая 2006 г. (трассер — хлорофилл-*a*)

мезомасштабного антициклонического прибрежного вихря типа различного в данном районе на рис. 6.16, т. е. в результате сдвиговой неустойчивости на периферии антициклона, как в случае вихря АЗ на рис. 6.13. Однако характер линий тока на рис. 6.15 не предполагает такой ситуации, а ИК-изображения NOAA за 18 и 19 сентября 1992 г., обработанные С. В. Станичным и Д. М. Соловьевым (МГИ НАНУ), не имеют необходимой четкости.

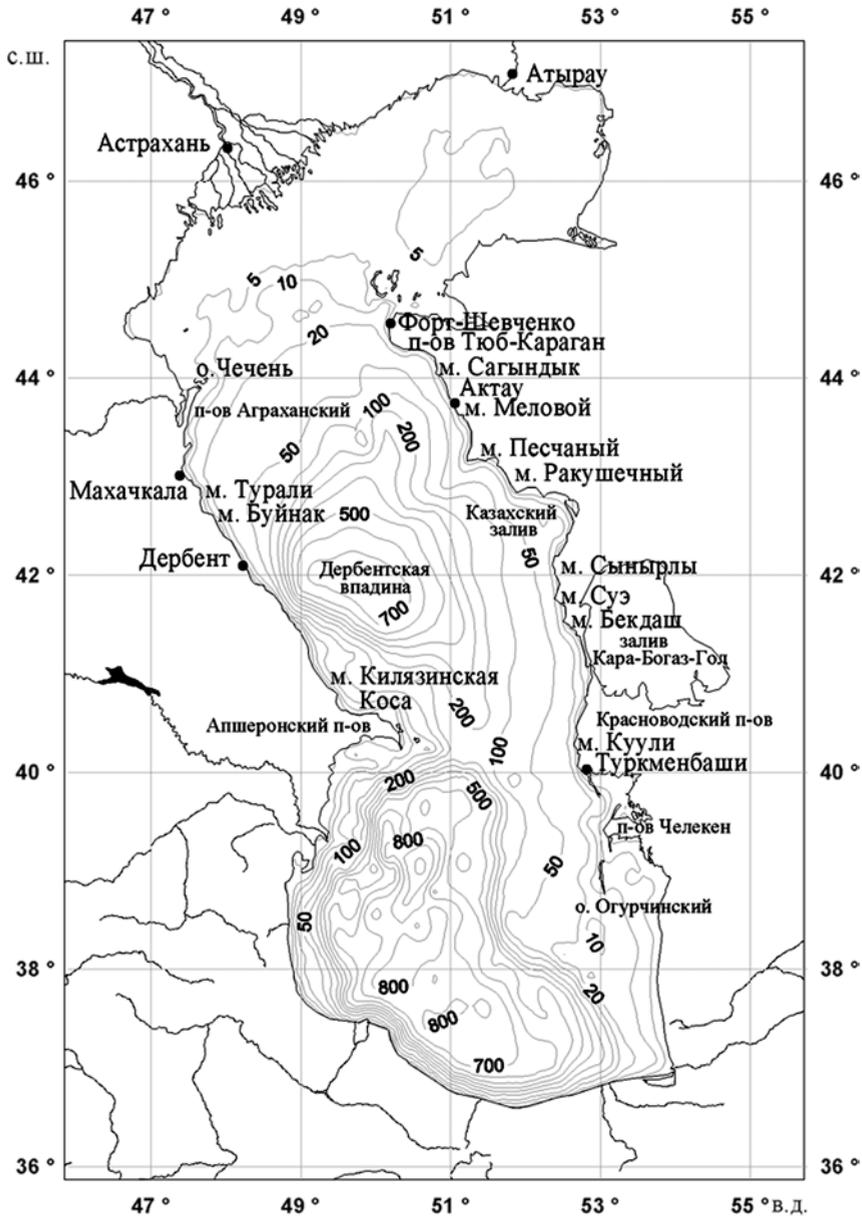
Другими гипотетическими механизмами образования подобных спиралевидных вихрей могут быть неоднородности атмосферного потока и конвекция в приповерхностном слое моря (Гинзбург, 1992; Голицын, 2010). В соответствии с ИК-

изображениями за 18 и 19 сентября 1992 г. (дневные изображения, как и рис. 6.15), температура в области, соответствующей вихрям на рис. 6.15, была примерно на 1,5 °С выше, чем к северу и западу от нее. Синхронные данные высокого разрешения о поле ветра в данном районе отсутствуют.

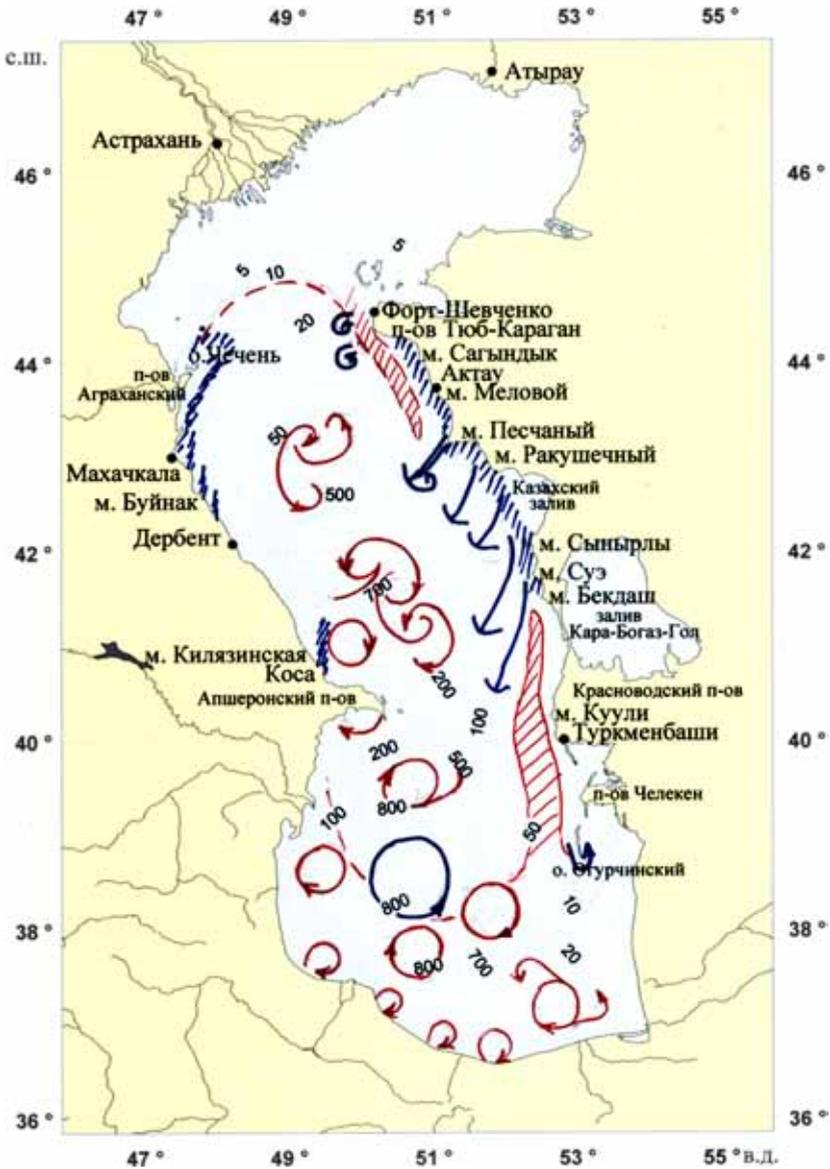
6.2. КАСПИЙСКОЕ МОРЕ

В соответствии с различными физико-географическими условиями и особенностями донной топографии, Каспийское море протяженностью примерно 1200 км в меридиональном направлении при средней ширине 310 км (рис. 6.17а, см. с. 337) принято разделять на три части: Северный, Средний и Южный Каспий, с условными северной и южной границами Среднего Каспия — соответственно по линиям о-в Чечень — м. Тюб-Караган и о-в Жилой (мористее восточной оконечности Апшеронского п-ова) — м. Куули (Косарев, 1975; Гидрометеорология..., 1992). Циркуляция Северного Каспия, глубины которого не превышают 20 м, определяется в основном ветром (Косарев, 1975; Гидрометеорология..., 1992). Динамика крупномасштабных и мезомасштабных течений Среднего и Южного Каспия, обусловленная совместным влиянием различных факторов (ветровым форсингом, особенностями береговой линии и донной топографии, бароклинностью моря), на сегодняшний день изучена недостаточно, что связано с малым количеством долговременных инструментальных наблюдений. Схемы поверхностных течений в этих глубоководных частях Каспия, составленные разными авторами в разные годы на основе натуральных наблюдений (см. рис. 12.7 в Гидрометеорология..., 1992)), расчета динамическим методом (Косарев, 1975) и моделирования (Гидрометеорология..., 1992; Тужилкин и др., 1997; Ибраев и др., 2001; Ибраев, 2002; Курдюмов, Озкой, 2004 и др.), заметно различаются. Так, в зимний период в Среднем Каспии основным элементом циркуляции, по результатам

расчета геострофических течений или моделирования, является циклонический круговорот. Летом здесь могут наблюдаться несколько вихрей противоположного знака с сохранением циклонического круговорота меньшего размера в западной части (Косарев, 1975; Тужилкин и др., 1997).



Р и с. 6.17а. Батиметрическая карта Каспийского моря.
Тонкие линии с цифрами — изобаты (глубина — в метрах)



Р и с . 6.17б. Типичные элементы мезомасштабной циркуляции Каспийского моря в теплый сезон

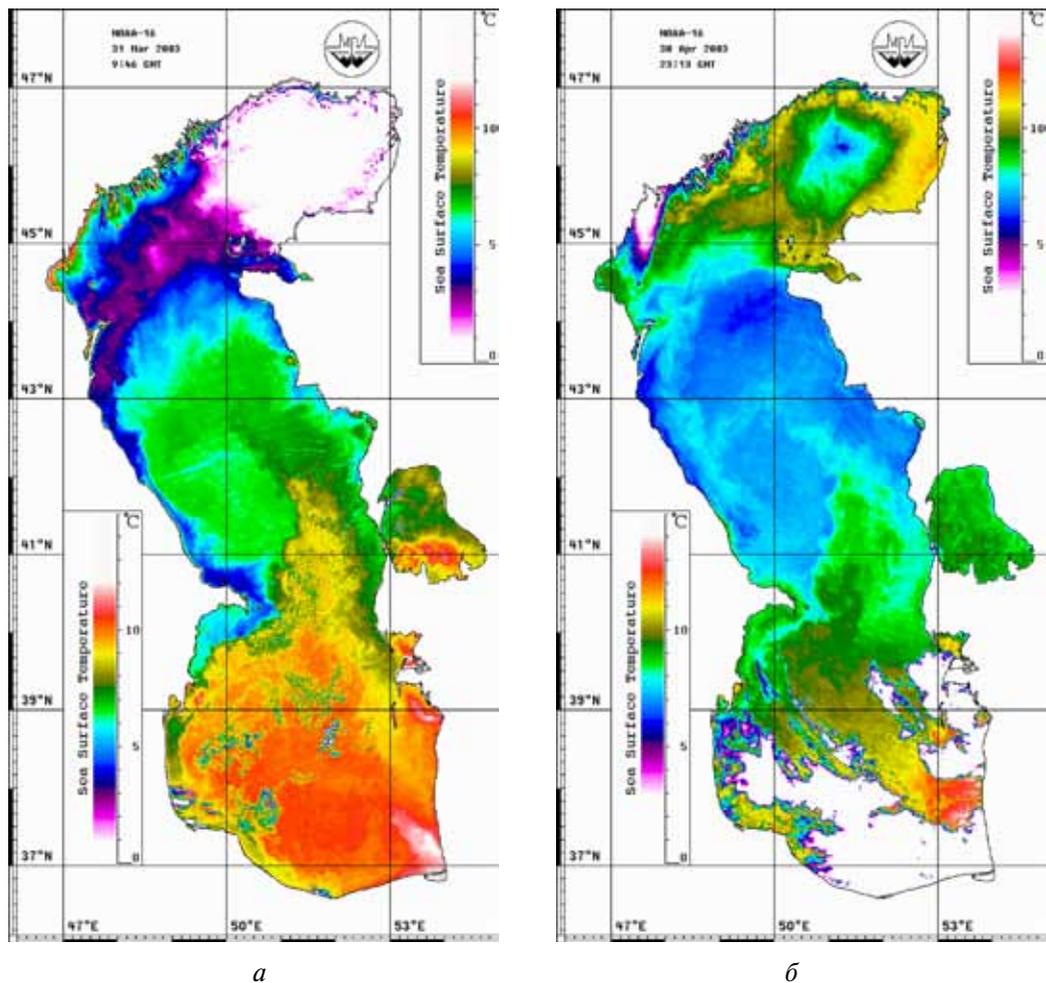
В Южном Каспии, по данным работы (Косарев, 1975), в оба сезона циркуляция имеет в основном антициклонический характер, тогда как, в соответствии с работой (Тужилкин и др., 1997), в Южном Каспии преобладает антициклоническая циркуляция зимой и циклоническая — летом, причем по западной периферии летнего циклонического круговорота происходит вторжение квазимеридиональной струи из Среднего Каспия.

Циклоническая зимняя циркуляция в Южном Каспии, как и в Среднем Каспии, приведена в работах (*Ибраев*, 2002; *Курдюмов*, *Озкой*, 2004). Летом на поверхности Среднего и Южного Каспия наблюдается перенос вод в юго-западном и западном направлениях (*Ибраев*, 2002; *Курдюмов*, *Озкой*, 2004), .

Случаи обнаружения мезомасштабных вихрей при выполнении гидрологических съемок или по данным буйковых постановок немногочисленны. В Среднем Каспии в литературе отмечались: антициклонические вихри диаметром примерно 40 км между Дербентом и м. Киялинская Коса (Каспийское..., 1986) и антициклон южнее о-ва Чечень летом (*Ибраев* и др., 1997; *Мамедов*, 2007); меандрирование юго-восточного течения между Махачкалой и Апшеронским п-овом с возможным образование антициклонических и циклонических вихрей с диаметрами 15–20 км (Каспийское..., 1986); циклонический вихрь у западного побережья Среднего Каспия с центром примерно на 42° с. ш. в августе-сентябре 2002 г. (*Сапожников* и др., 2003). В Южном Каспии наблюдались: антициклоническая циркуляция между устьем р. Куры и Апшеронским п-овом (Каспийское..., 1986; *Гидрометеорология...*, 1992), антициклоны в юго-западном и юго-восточном «углах» Южного Каспия и восточнее м. Сефид-Руд (*Катунин*, *Сапожников*, 1997), циклонический вихрь с диаметром около 10 км в самой южной точке (центр на 52° в. д.). (*Катунин*, *Сапожников*, 1997).

Об антициклонической циркуляции в южной части Южного Каспия в области размером примерно 160 км по широте и долготе с центром на 37,5° с. ш., 52° в. д. свидетельствуют данные буйковых станций (*Мамедов*, 2007). В то же время отмечается, что в глубоководной части Южного Каспия преобладает крупномасштабный циклон, образованный макроциркуляцией в данном регионе и особенно ярко выраженный в зимнее время (*Катунин*, *Сапожников*, 1997).

Богатую информацию об элементах крупномасштабной и мезомасштабной динамике вод Каспийского моря дают спутниковые изображения. Заметим, что ни эпизодические гидрологические измерения, ни известные модели (даже модель Курдюмова и Озкой (2004) с пространственным разрешением по горизонтали 4 км) не дают представления о сложной пространственной структуре летнего прибрежного апвеллинга у восточного побережья Среднего Каспия, которая стала очевидной лишь с появлением спутниковых изображений с высоким пространственным и временным разрешением (*Sur et al.*, 2000; *Гинзбург* и др., 2005, 2006). ИК-изображения со спутников AVHRR NOAA и MODIS Aqua, карты цветности SeaWiFS и MODIS Aqua и сопутствующие данные о силе и направлении ветра (измерения на гидрометеостанциях, данные реанализа NCEP) позволили: получить синоптическую картину апвеллинга у западного и восточного побережий Среднего Каспия и проследить ее динамику; выявить не известные ранее нестационарные элементы циркуляции (вдольбереговые струеобразные потоки теплых вод из Северного и Южного Каспия в Средний; струи и вихри, связанные с прибрежным апвеллингом; мезомасштабные вихри в глубоководных регионах моря и вдоль иранского побережья) и их влияние на пространственные неоднородности в распределении хлорофилла-*a*. Эти элементы циркуляции вод Среднего и Южного Каспия, характерные для теплого сезона (в зимний период информативные спутниковые изображения практически отсутствуют) схематически показаны на рис. 6.17б (см. с. 338), а наиболее информативные спутниковые изображения приведены на рис. 6.18–6.27 (см. с. 340–354).



Р и с. 6.18. ИК-изображения, полученные со спутника NOAA-16 в 2003 г.:
a — 31 марта; *б* — 30 апреля

6.2.1. Циклонический круговорот в Среднем Каспии

Циклонический круговорот в Среднем Каспии, характерный элемент крупномасштабной циркуляции в холодный период, отчетливо проявляется на спутниковых изображениях в марте-июне и октябре (см. рис. 6.18, 6.19) (зимой информативные изображения редки из-за облачности). Вовлечение теплых вод из Южного Каспия по восточной периферии этого круговорота над Дербентской впадиной с центром на $\sim 42^\circ$ с. ш. и 50° в. д. обеспечивает их распространение в холодный период на север до $43\text{--}44^\circ$ с. ш., в то время как южный поток по его западной периферии способствует распространению холодных и распресненных вод из Северного Каспия в Средний Каспий (см. рис. 6.18*a*). По мере весенне-летнего прогрева размер поверхностного циклонического круговорота уменьшается и северная граница вовлеченных южно-

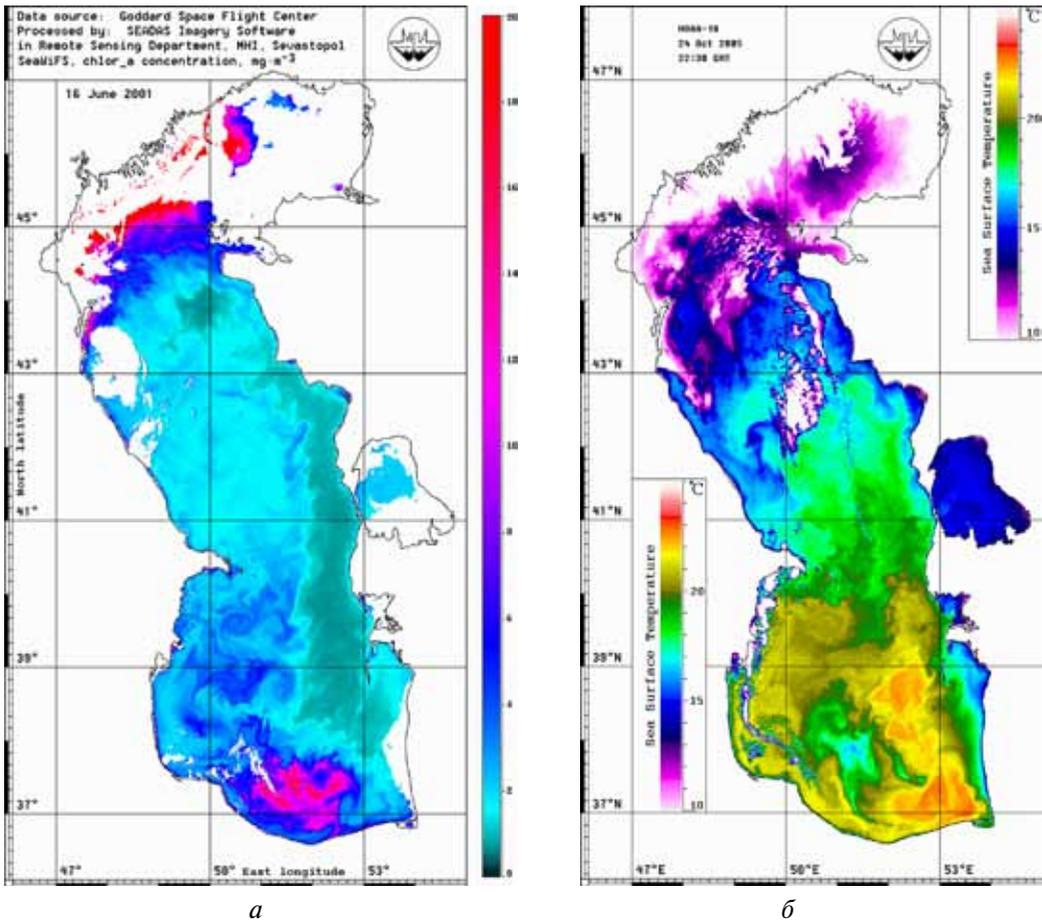


Рис. 6.19. Изображения, полученные: *a* — радиометром SeaWiFS 16 июня 2001 г.;
б — AVHRR NOAA-16 24 октября 2005 г.

каспийских вод смещается на юг (см. рис. 6.18*б*, 6.19*а*). В теплый сезон на месте этого крупномасштабного круговорота часто наблюдаются мезомасштабные вихри, вихревые диполи и струи апвеллинга (см. рис. 6.17*б*, 6.19*б*, 6.23), однако и тогда примерно в центре прежнего круговорота нередко различается мезомасштабный циклон с диаметром ~40–50 км (см. рис. 6.26*а*, *б*). Осенью (с начала октября) циклонический круговорот снова начинает проявляться на ИК-изображениях (см. рис. 6.19*б*).

6.2.2. Апвеллинг у западного и восточного побережий

Характер апвеллинга у западного и восточного побережий Каспия существенно различается, что связано с характером береговой линии/донной топографии (рис. 6.17*а*), преобладающими локальными направлениями ветра, наличием интенсивного юго-восточного течения у западного побережья.

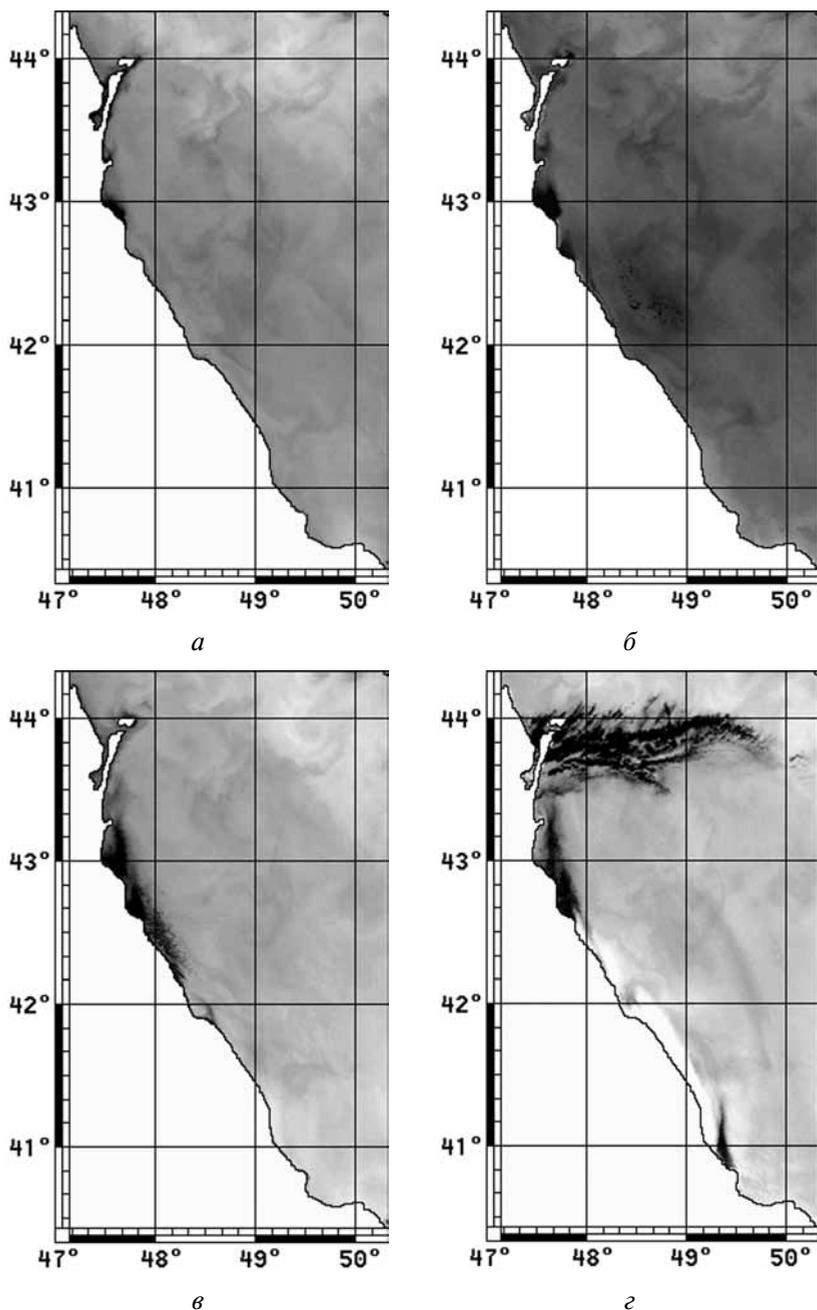


Рис. 6.20. Фрагменты ИК-изображений, полученных со спутника NOAA-16 в августе 2002 г.: *a* — 12-го в 23:02; *б* — 13-го в 10:28; *в* — 13-го в 22:51; *г* — 14-го в 10:17 (время гринвичское). Темные области — холодные воды апвеллинга (темная область вдоль берега между мысом Буйнак и Дербентом на рис. 6.20*в* — туман, темная область зональной ориентации на рис. 6.20*г* — облачность)

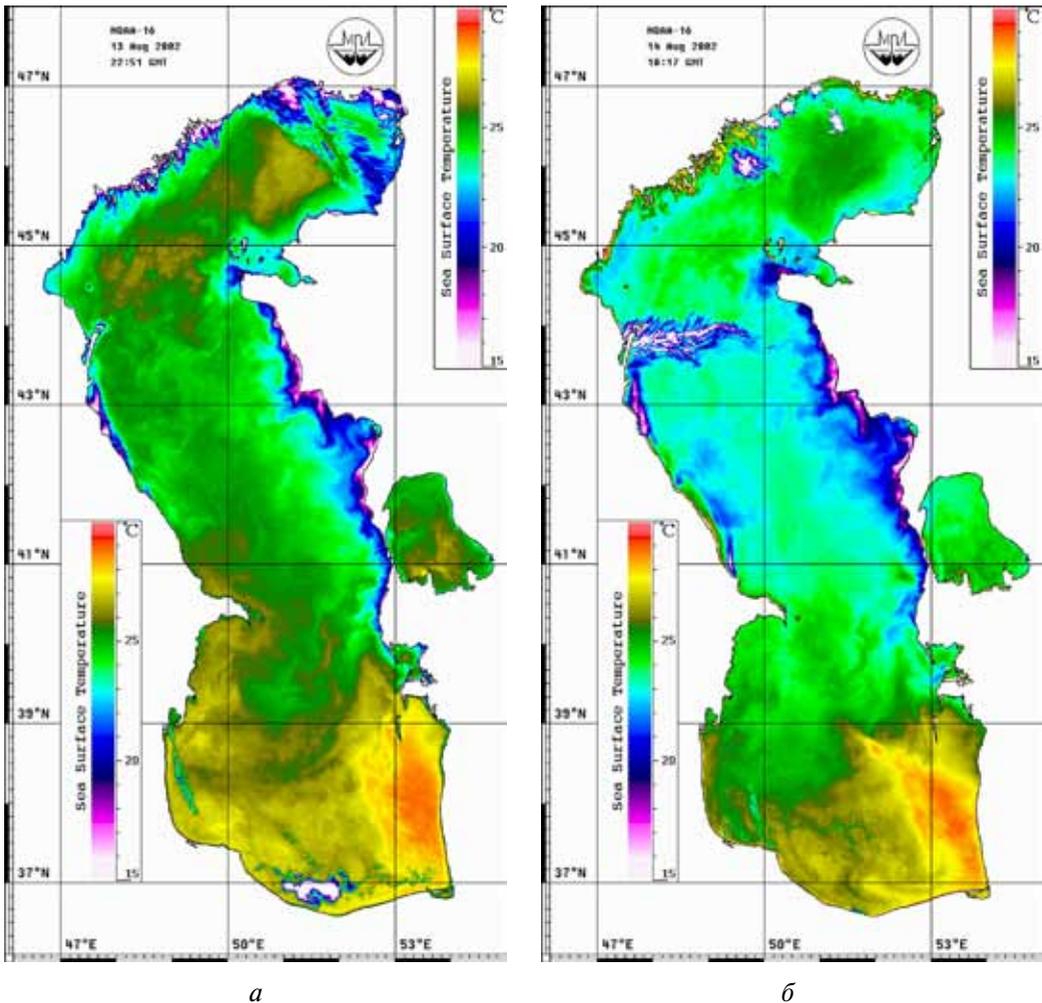
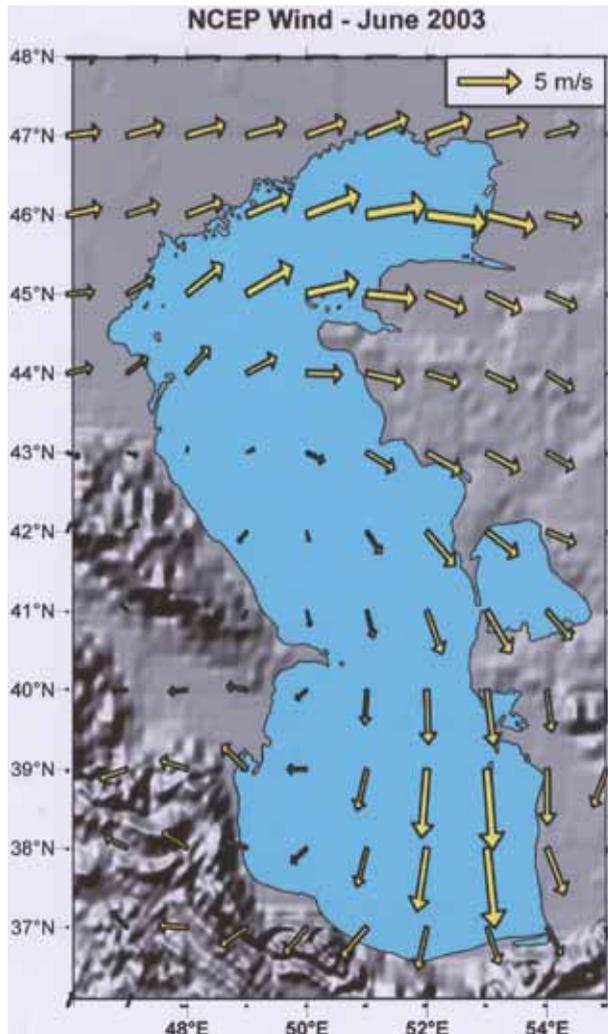


Рис. 6.21. ИК-изображения, полученные со спутника NOAA-16 в 2002 г.:
 а — 13 августа; б — 14 августа

Для западного побережья Среднего Каспия характерны локальные синоптические подъемы холодных вод при благоприятных для апвеллинга направлениях ветра. В основном это, в соответствии с общим направлением береговой черты, ветры юго-восточного направления на пространстве от п-ова Аграханский до Апшеронского п-ова (Косарев, 1975; Архипкин, 1990; Гидрометеорология..., 1992). На квазизональных участках (Махачкала – м. Турали, районы м. Буйнак и Килязинская Коса) при ветрах восточных румбов образуются холодные струи северного направления с шириной 10–20 км, длиной до ~60 км, скоростью продвижения фронта до 140 см/с, перепадом температуры относительно окружающих вод до 11–12 °С, временем жизни — несколько дней (см. рис. 6.20, 6.21) (Гинзбург и др., 2005). Отличительная особенность этих струй — в том, что, распространяясь от берега сначала почти поперек изобат,



Р и с . 6.22а. Среднемесячное поле ветра над морем в июне 2003 г. по данным NCEP

в итоге они в соответствии с изменениями линии берега и хода изобат становятся параллельными им. Задержка во времени наступления апвеллинга относительно северного участка (вблизи Махачкалы) последовательно увеличивалась в южном направлении.

Заметим, что связанный с апвеллингом минимум температуры часто наблюдается не у берега, а на расстоянии в несколько километров и более от него (например, холодные воды вдоль изобат ~5–10 и ~20–50 м у п-ова Аграханский и севернее м. Киязинская Коса соответственно (см. рис. 6.22б, в). Частота проявления апвеллинга у/вблизи западного побережья Каспия имеет существенную межгодовую изменчивость. Например, вблизи Махачкалы в 2002 и 2003 гг. апвеллинг в период с мая

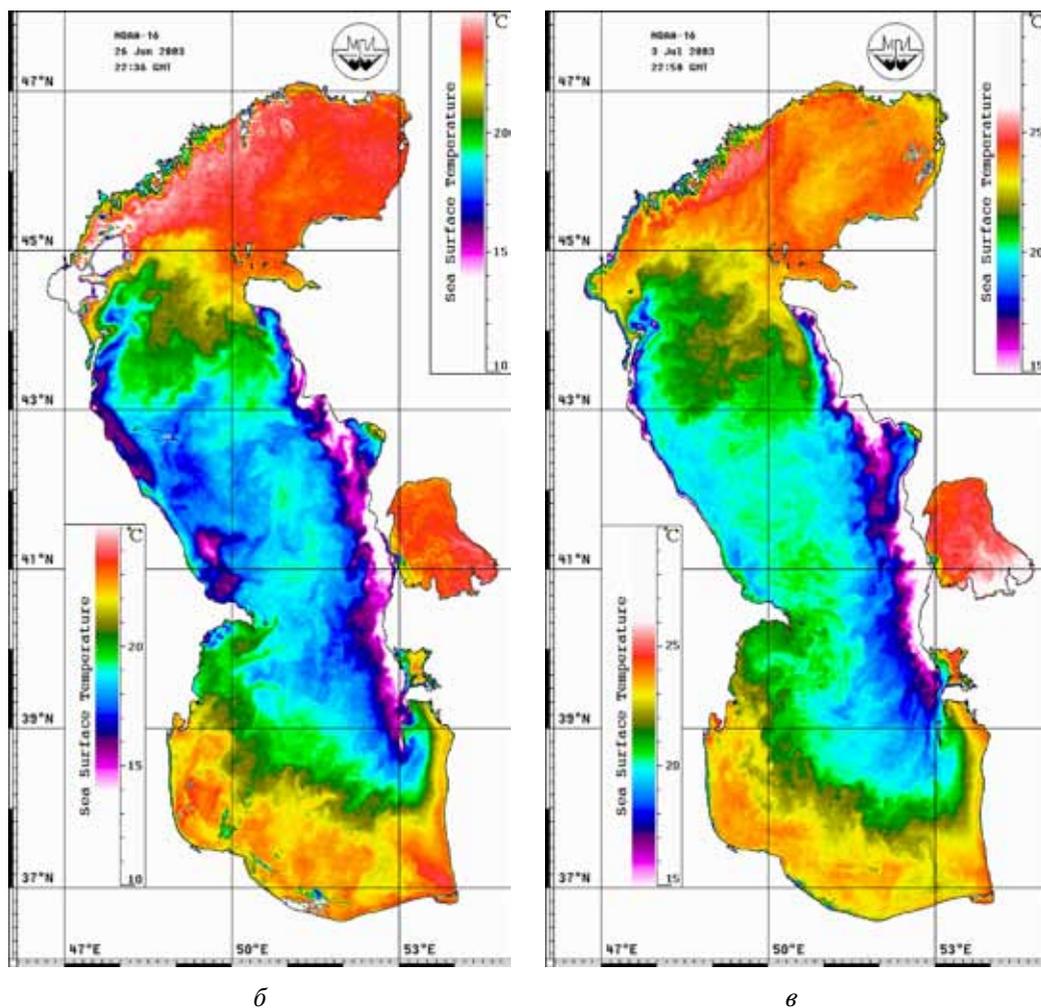


Рис. 6.22б, в. Синоптическая ситуация с интенсивным апвеллингом одновременно у западного и восточного побережий Каспия: ИК-изображения, полученные со спутника NOAA-16 23 июня (б) и 3 июля (в) 2003 г.

по сентябрь включительно наблюдался в течение 9 и 27 дней соответственно. Возможно, что фактором, определяющим эту изменчивость, служит, помимо межгодовой изменчивости силы и направления благоприятного для апвеллинга ветра, межгодовая изменчивость стока р. Волга. В годы нормального или повышенного речного стока (именно таким был 2002 г.) (Катунин и др., 2003) приток распресненных вод, распространяющихся вдоль западного побережья Каспия, компенсирует стон поверхностных вод от берега и апвеллинг на поверхности проявляется реже. И наоборот, в годы пониженного речного стока вероятность поверхностного проявления апвеллинга при прочих равных условиях должна возрастать. Подобная ситуация с проявлением апвеллинга наблюдается у восточного побережья Италии (Коротенко, 2007).

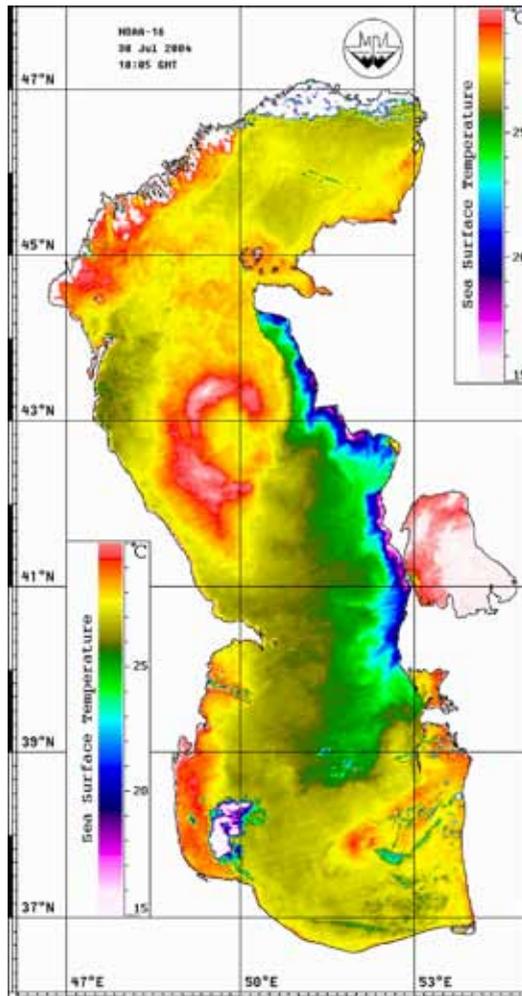
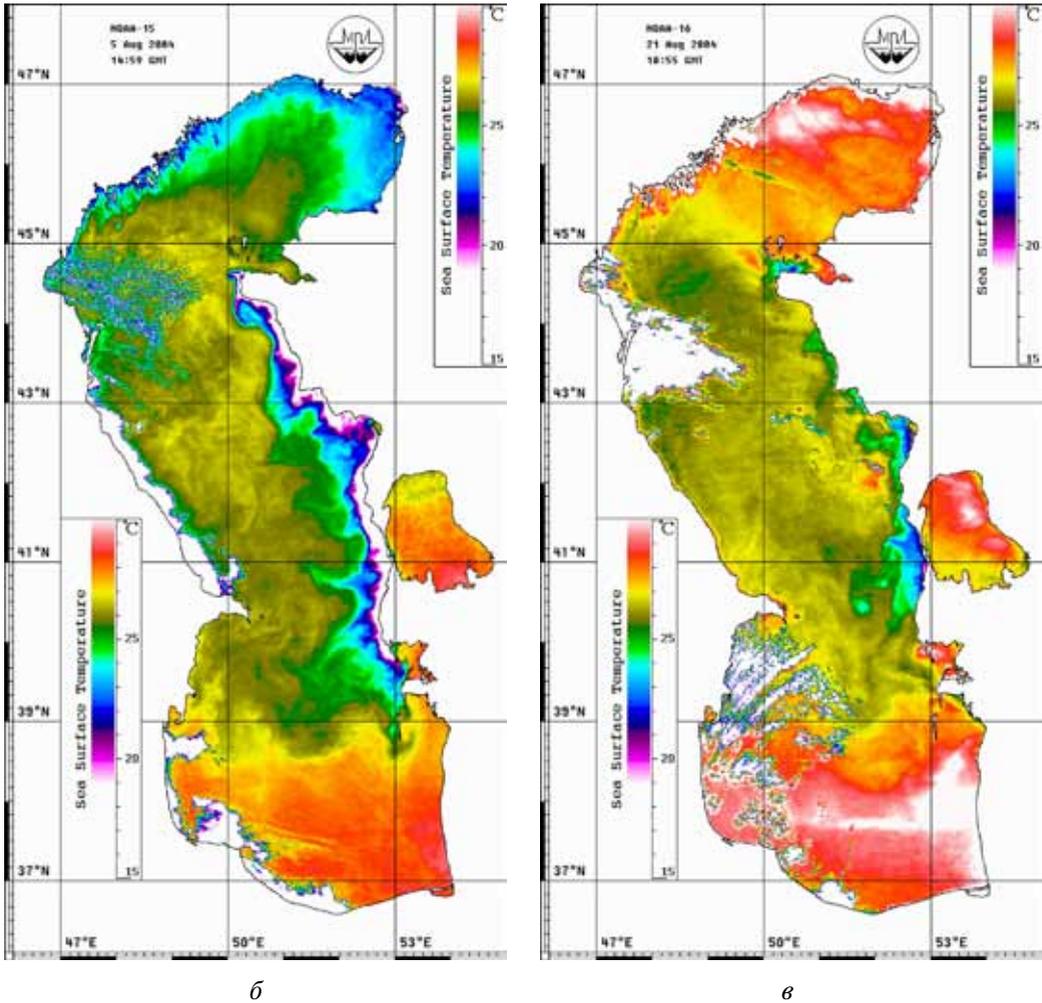


Рис. 6.23а ИК-изображение, полученное 30 июля 2004 г. (NOAA-16)

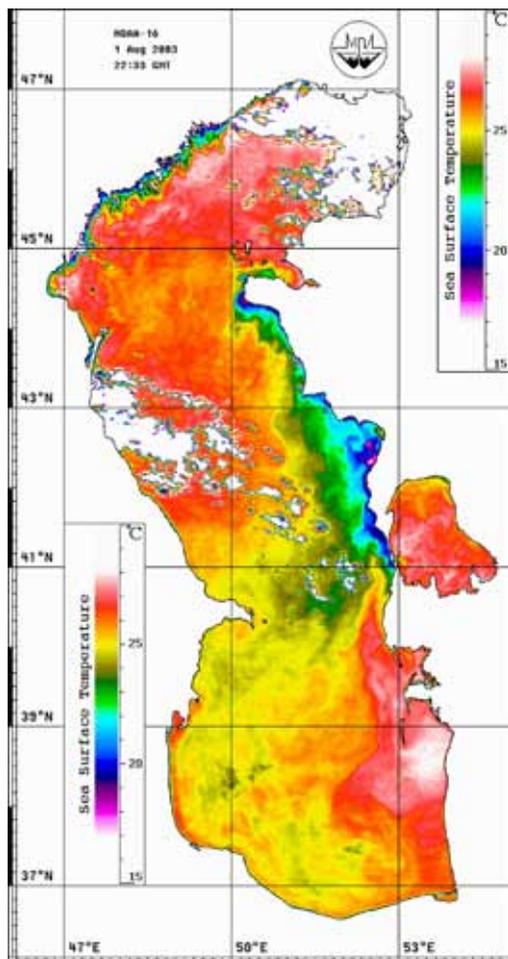
В отличие от апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия с эпизодическими выходами холодных вод на поверхность, апвеллинг у его восточного побережья имеет сезонный характер, обусловленный преобладающими северо-западными ветрами в летний сезон, совпадающими по направлению с линией берега (в среднем) (Косарев, 1975; Архипкин, 1990; Гидрометеорология..., 1992). Сезонный апвеллинг вдоль восточного побережья от п-ова Тюб-Караган до Красноводского п-ова (при сильных северных и северо-западных ветрах — до о-ва Огурчинский, см. рис. 6.22) с холодной температурной аномалией у берега наблюдается с середины мая до середины октября. Изрезанность береговой линии и разнообразие ветровых условий вдоль побережья с большой меридиональной протяженностью обуславливают существенную пространственно-временную изменчивость зоны апвеллинга (Гинзбург и др., 2006), а близость к берегу 50-метровой изобаты на большей части побережья (на этой



Р и с . 6.23б, в. ИК-изображения, полученные в 2004 г.:
 б — 5 августа (NOAA-15); в — 21 августа (NOAA-16)

глубине находятся глубинные воды с температурой 10–12 °С (Косарев, Тужилкин, 1995) — яркое проявление апвеллинга при сравнительно слабых ветрах, не превышающих в теплый сезон в большинстве случаев 5–7 м/с. Например, при восточных ветрах апвеллинг у восточного побережья (сгон) был слабым (см. рис. 6.21), тогда как в ситуации конца июня — начала июля 2003 г., при преобладающих ветрах западных румбов над Северным Каспием и северных — над Средним Каспием (см. рис. 6.22а), наблюдался интенсивный апвеллинг у обоих побережий (см. рис. 6.22б, в).

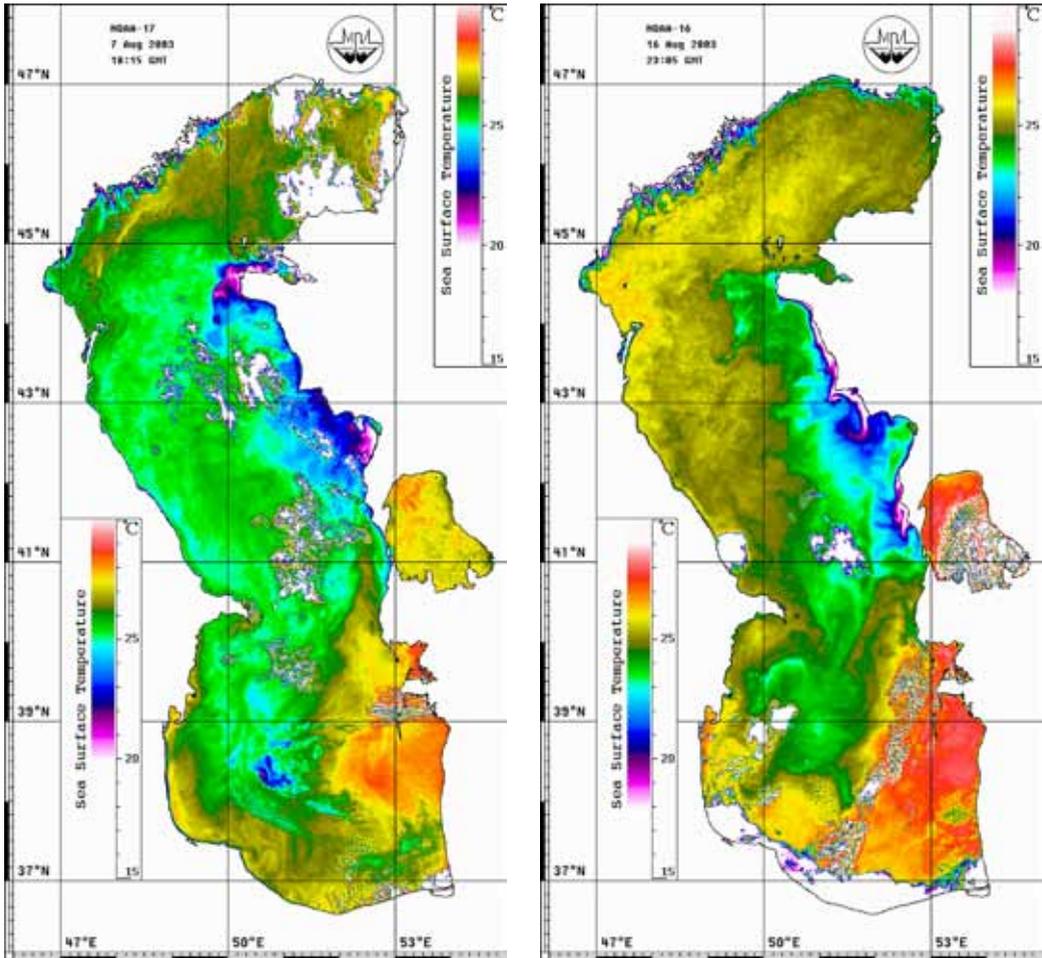
Локальная ширина зоны апвеллинга (расстояние от берега, в пределах которого прослеживаются трансформированные апвеллинговые воды) зависит от силы, направления и продолжительности ветрового воздействия, а также от горизонтального масштаба сопровождающих апвеллинг когерентных структур.



Р и с. 6.24а. ИК-изображение, полученное в 1 августа 2003 г. (NOAA-16)

Например, 3 июля 2003 г. ширина зоны менялась от ~25 км севернее м. Песчаный до ~150 км на юге (см. рис. 6.22б). При этом протяженность прибрежных областей подъема глубинных вод с температурой 10–12 °С (очагов апвеллинга) у южного побережья п-ова Тюб-Караган, за м. Сагындык, Скалистый, Меловой, Песчаный, Сынырлы, Суэ и Бекдаш, а также в прибрежной полосе между м. Песчаный и Ракушечный не превышала 5–10 км.

Области наибольшего понижения температуры воды и величины этого понижения в разных синоптических ситуациях различны. Например, 3 июля 2003 г. (см. рис. 6.22б) наиболее интенсивный апвеллинг наблюдался за мысами вдоль участка побережья, ориентированного примерно в направлении, совпадающим с направлением преобладавшего в то время северного ветра. Наименьшие ТПМ 17–18 °С зарегистрированы в начале августа 2003 г. у западного побережья п-ова Тюб-Караган и южного побережья Казахского залива (см. рис. 6.21а) после умеренного восточного



б

в

Рис. 6.24б, в. ИК-изображения, полученные в августе 2003 г.:
б — 7-го (NOAA-17); в — 16-го (NOAA-16)

ветра в конце июля, сменившегося затем северным. При этом области пониженной температуры у м. Суэ и Бекдаш находились не у их южных сторон, как при ветрах северных румбов, а у северных.

Зона апвеллинга многофронтальна. Она включает фронты, связанные с подъемом нижележащих вод к поверхности и выходом на поверхность термоклина: фронты на границах трансформированных в результате прогрева и перемешивания апвеллинговых вод, а также фронты на границах сопровождающих апвеллинг когерентных структур — струй и вихрей (см. ниже). Часто наблюдающаяся южнее м. Песчаный ступенчатая структура фронтальной зоны апвеллинга с несколькими фронтами трансформированных апвеллинговых вод, вытянутыми в среднем вдоль побережья (см. рис. 6.22, 6.23), связана, возможно, с чередованием усиления и ослабле-

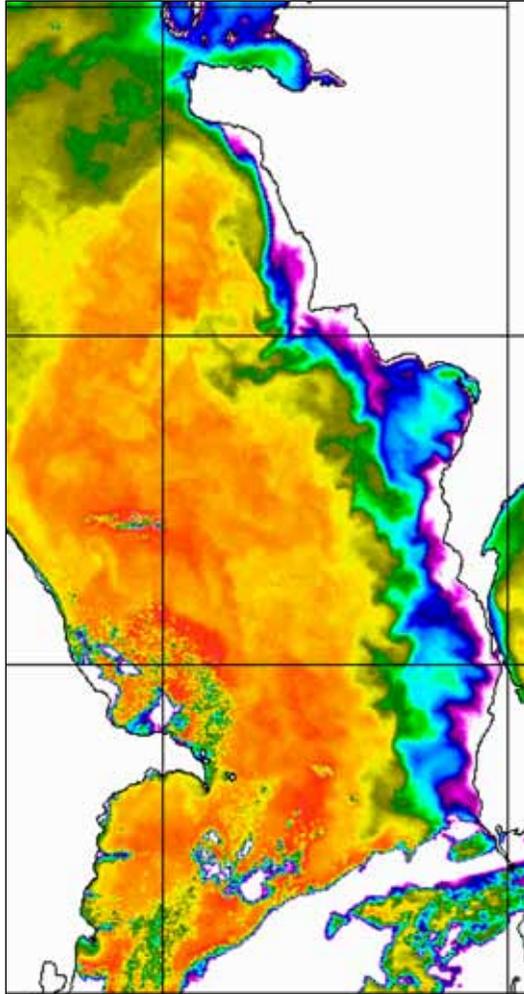


Рис. 6.25а. Фрагмент ИК-изображения, полученного 15 сентября 2003 г. в 02:17 (NOAA-12)

ния апвеллинга под влиянием соответствующего изменения силы и направления ветра. Как правило, резких фронтальных разделов в зоне апвеллинга не наблюдается.

На каждом из фронтов многофронтальной зоны апвеллинга, ориентированных в среднем параллельно берегу, формируются собственные короткоживущие элементы неустойчивости разных горизонтальных масштабов, наиболее ярко выраженные на самом удаленном от берега фронте. Типичным элементом такой неустойчивости являются поперечные струи (или системы струй) трансформированных апвеллинговых вод, перпендикулярные или наклонные к фронту (и изобатам) и ориентированные в основном на запад и юго-запад (см. рис. 6.22, 6.23а, б, 6.25). Их длина (протяженность от фронта) меняется в широких пределах: от 20–30 км (например, севернее 41° с. ш. на рис. 6.22б) до ~150 км (например, ~100 км к югу от 40° с. ш. на рис. 6.22б и

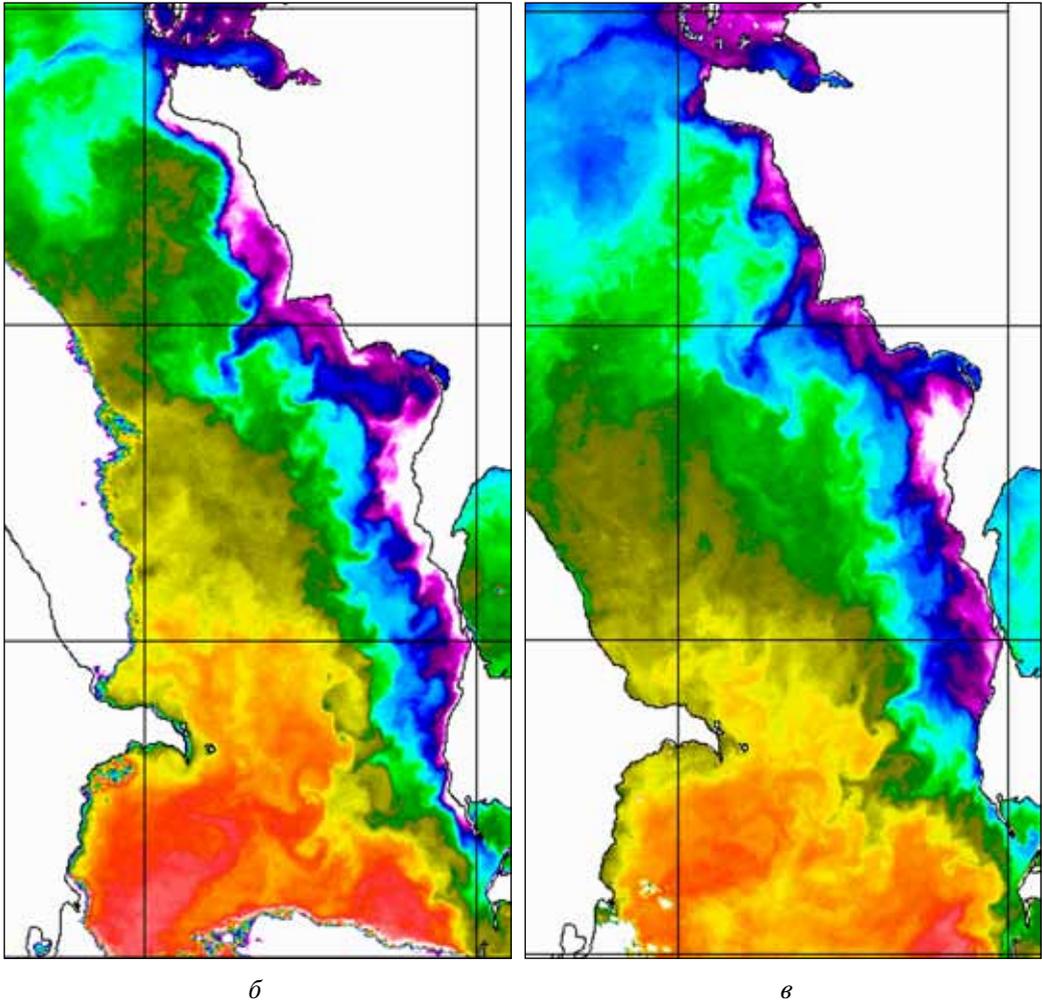
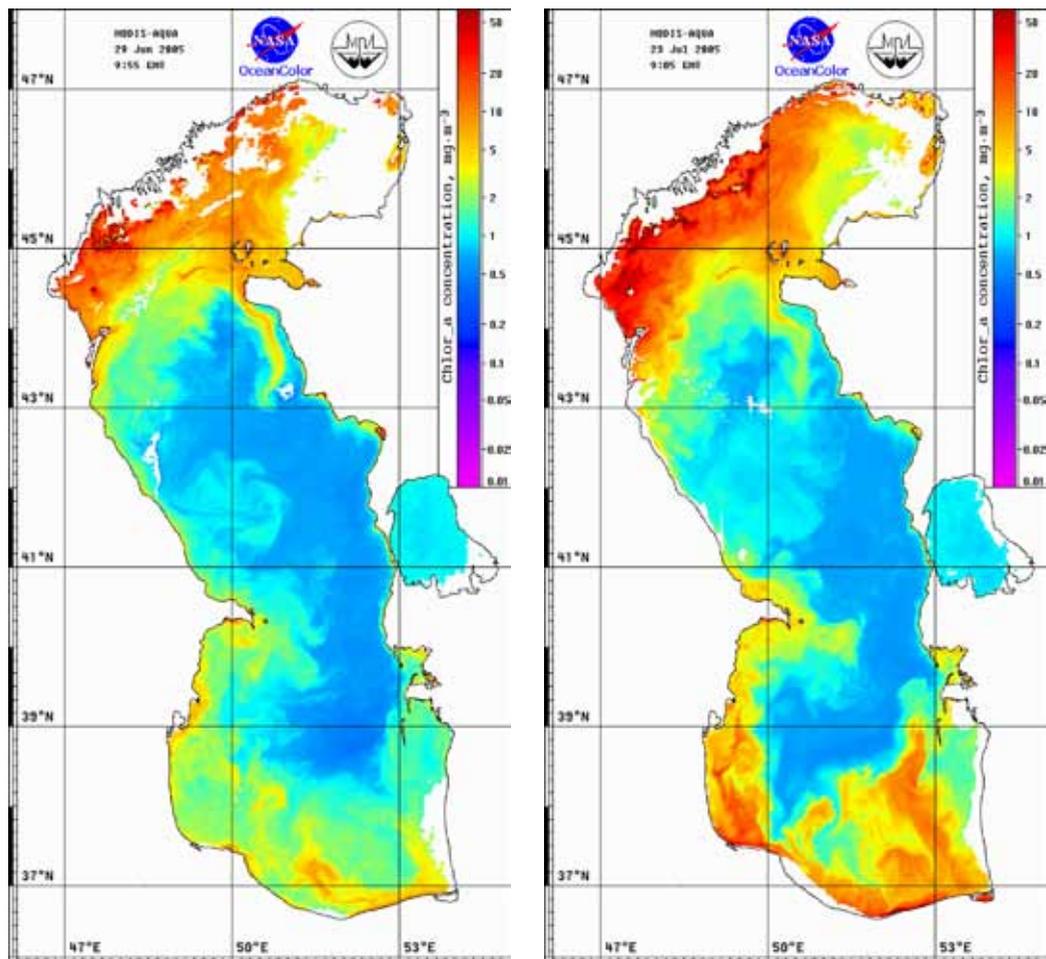


Рис. 6.25б, в. Фрагменты ИК-изображений, полученных в 2003 г.: б — 22 сентября в 22:50 (NOAA-16); в — 25 сентября в 09:55 (NOAA-16) (время гринвичское)

севернее м. Песчаный на рис. 6.25в). Соответственно расстояние от берега, на которое переносятся подобными струями трансформированные воды апвеллинга, может превышать 150 км (на рис. 6.23а на широте Апшеронского п-ова оно около 250 км), обеспечивая водообмен между шельфом и глубоководным бассейном и, в частности, проникновение трансформированных апвеллинговых вод из Среднего Каспия в Южный Каспий до примерно 38° с. ш. (рис. 6.22б). Расстояние между соседними структурами (при наличии системы струй) также меняется в широких пределах — от ~20–30 км (например, севернее 41° с. ш. на рис. 6.22б) до ~100 км, а их ширина составляет ~8–25 км. Температурный контраст воды в струях относительно окружающих вод обычно равен ~1–1,5 °С. Нередко они имеют Т-образную (грибовидную) форму. Наиболее часто струи формируются вблизи мысов (Песчаный, Куули и др.) и в зонах



Р и с. 6.26. Изображения, полученные спектрометрией MODIS Aqua в 2005 г.:
а — 29 июня; *б* — 23 июля (трассер — хлорофилл-*а*)

апвеллинга с вогнутыми участками побережья (например, между м. Бекдаш и Куули, Песчаный и Ракушечный, рис. 6.22), что свидетельствует о влиянии орографии и рельефа дна на их формирование.

Поперечные струи апвеллинга наблюдаются в основном в июле-сентябре. Типичное время жизни таких струй — от одного до нескольких дней, хотя струя в районе м. Песчаный на рис. 6.25 прослеживалась на ИК-изображениях в течение примерно двух недель, с 14 по 28 сентября 2003 г., при преобладающих ветрах восточных румбов. Интересная особенность эволюции этой струи — постепенное смещение ее основания на север (с $\sim 42^{\circ} 50'$ с. ш. на рис. 6.25*а* на $43^{\circ} 30'$ с. ш. на рис. 6.25*б*) со скоростью между 23 и 25 сентября ~ 17 см/с, при неизменном положении головной части структуры в северо-восточной части Дербентской впадины. Не исключено, что причиной этого стабильного положения «шляпки» грибовидной структуры стал цикло-

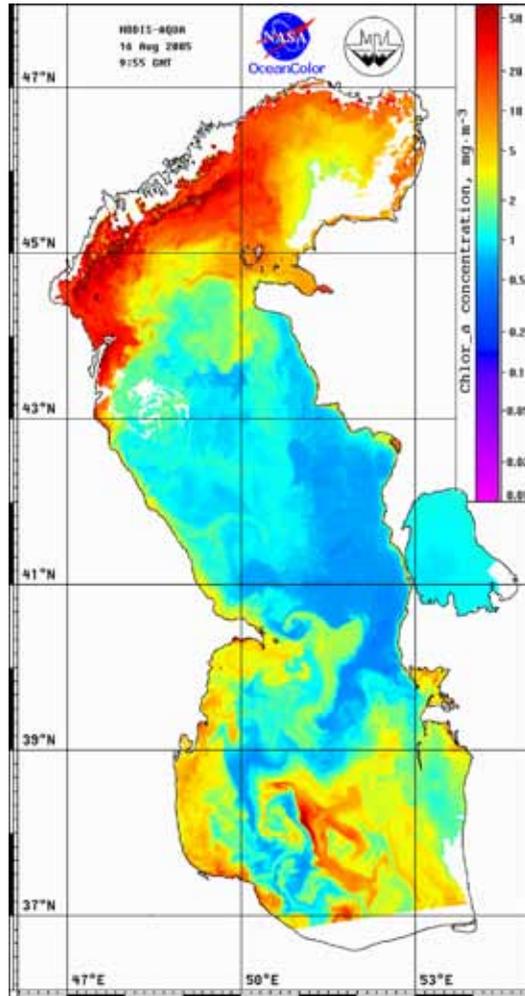


Рис. 6.27a. Изображение, полученное 16 августа 2005 г. спектрометрией MODIS Aqua

нический вихрь с диаметром ~ 20 км и центром на $\sim 42^{\circ}40'$ с. ш. и $50^{\circ}40'$ в. д. (пятно относительно холодных вод еще различалось здесь 3 октября 2003 г., после распада струи). Однако смещение на север основания ее «ножки» и элемента циклонической завихренности вблизи м. Скалистый предполагает наличие в данной ситуации вдольберегового течения северного направления.

Помимо поперечных струй, на мелководных участках с резким изменением линии берега наблюдаются «продольные» струи, ориентированные вдоль изобат и в направлении ветра: например, направленные на юг струи длиной ~ 20 – 30 км и шириной ~ 8 км за м. Сынырлы, Бекдаш на рис. 6.24в при северном ветре. Причем за пределами 20-метровой изобаты от них отходят поперечные струи трансформированных апвеллинговых вод. Широкая (20–40 км) полоса холодных вод длиной около 130 км,

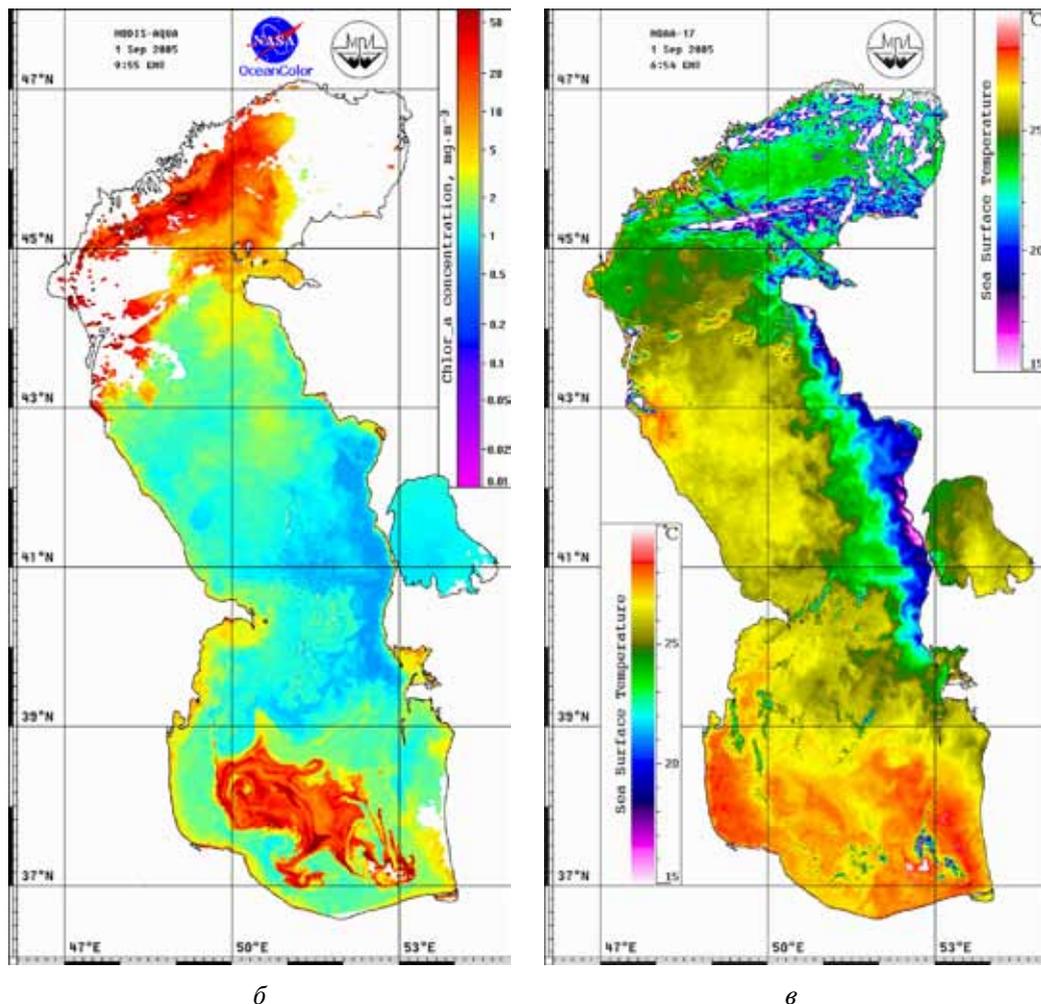


Рис. 6.27б, в. Изображение, полученное в 2005 г. спектрометриком MODIS Aqua 1 сентября (б) (трассер — хлорофилл-а) и ИК-изображение, полученное со спутника NOAA-17 1 сентября (в)

окаймляющая Казахский залив при сильных северных ветрах и при отсутствии апвеллинга в самом заливе (см. рис. 6.22), ориентирована примерно вдоль 50-метровой изобаты. Временной масштаб возникновения и существования подобных холодных полос мористее побережья — несколько дней, определяемый, по-видимому, временным масштабом изменчивости локального ветрового поля.

Струи апвеллинга обеспечивают также горизонтальный водообмен в северной части Южного Каспия (см. рис. 6.22б, 6.22в, 6.23). Мощный заток трансформированных вод апвеллинга из Среднего Каспия в Южный при северном ветре, хорошо видный на рис. 6.24в, был обусловлен, по-видимому, вихревой циркуляцией вод в Южном Каспии.

6.2.3. Струйные потоки из Северного и Южного Каспия в Средний Каспий

Синоптическая ситуация с северным ветром вдоль восточного побережья моря и антициклонической циркуляцией в Среднем Каспии приводит к распространению теплых вод из Северного Каспия струйным потоком по западному побережью п-ова Тюб-Караган до $\sim 43^\circ$ с. ш. (см. рис. 6.22*в*) (Гинзбург и др., 2006). Ширина такой струи теплых вод на рис. 6.22*в* составляла ~ 20 км, а скорость продвижения ее фронта на юго-восток, оцененная по ИК-изображениям для 26 июня и 3 июля 2003 г., была ~ 15 см/с.

Ветры восточных румбов, более частые в августе-октябре, способствуют распространению теплых вод из Южного Каспия в Средний Каспий в виде струйных потоков от $39\text{--}40^\circ$ до $41^\circ 30'\text{--}42^\circ$ с. ш. в пределах 50-метровой изобаты (рис. 6.24*а, б*). Скорость продвижения таких струеобразных потоков из Южного Каспия на север, оцененная по смещению их головной части между последовательными ИК-изображениями, — около 20 см/с, а продолжительность проявления на изображениях — порядка одной-двух недель. Преобладание таких ветров в сентябре-октябре является причиной более редкого проявления апвеллинга у Краснодарского п-ова осенью по сравнению с более северными участками побережья.

Однако, например, в конце сентября 2003 г. восточные ветры не привели к появлению подобных теплых струй из Южного Каспия и, соответственно, к отсутствию апвеллинга южнее Казахского залива (см. рис. 6.25). Определяющие факторы в каждом конкретном случае — это, по-видимому, не только локальные ветры, но и циркуляция вод, сложившаяся под действием ветрового поля над всем бассейном Каспия.

6.2.4. Вихревая динамика

Вихри в Среднем и Южном Каспии имеют широкий диапазон пространственных масштабов — от примерно 10 км до ~ 80 км. Время их наблюдения ограничивается в большинстве случаев несколькими днями, а наличие облачности и слабые контрасты трассера не позволяют проследить эволюцию и выявить механизмы образования. Наиболее очевидна природа вихрей, связанных с апвеллингом у восточного побережья Каспия.

При северных и северо-восточных ветрах от зоны апвеллинга у западного побережья п-ова Тюб-Караган отделяются циклонические вихри с диаметром $D \approx 10\text{--}20$ км (см. рис. 6.21, 6.24), аналогичные наблюдавшимся у м. Херсонес в Черном море (Гинзбург и др., 1998). Процесс последовательного формирования циклонов на фронте апвеллинга и их последующего распространения на запад и юг в августе 2003 г. показан на рис. 6.24. Средняя скорость перемещения циклона, оцененная по двум ИК-изображениям (см. рис. 6.24*а и б*), составила ~ 8 см/с. В результате отделения от зоны апвеллинга циклонических вихрей, различавшихся на ИК-изображениях до 18 августа 2003 г., холодными трансформированными водами апвеллинга оказалась охвачена обширная область в пределах шельфа между $\sim 44^\circ 30'$ и $43^\circ 30'$ с. ш. с западной границей на 49° в. д. С началом осеннего выхолаживания вод, когда подповерхностные воды теплее поверхностных, подобные вихри апвеллигового происхождения переносят более теплую по сравнению с окружающими воду (*Shipilova*, 2000).

Короткоживущие циклонические вихри с $D \approx 20$ км часто наблюдаются на фронте апвеллинга — например, вдоль побережья от п-ова Тюб-Караган до м. Песчаный (см. рис. 6.25в, 6.27в), вблизи м. Суэ и Бекдаш. Образование циклонов у мысов связано, по-видимому, с неустойчивостью потока (фронта) вблизи особенностей линии берега и донной топографией. Циклонические вихри с $D \approx 20$ км и временем жизни до примерно двух недель, имеющие апвеллинговое происхождение, наблюдаются также за пределами шельфа на глубине ~ 200 м (в северо-восточной и юго-восточной частях Дербентской впадины на рис. 6.25в и 6.23б соответственно; в обоих случаях они — составляющие поперечных струй апвеллинга), на фронте трансформированных вод апвеллинга в Среднем и Южном Каспии (рис. 6.25б, 6.23в). Антициклонические вихри в зоне апвеллинга встречаются редко (например, антициклоны с $D \approx 30$ км в Казахском заливе на рис. 6.24а и на конце струи апвеллинга на рис. 6.22б).

Часто обнаруживаемым на спутниковых изображениях элементом мезомасштабной циркуляции Среднего Каспия является антициклонический вихрь с центром на $41^\circ\text{--}41^\circ 30'$ с. ш., $50^\circ\text{--}50^\circ 30'$ в. д. (между Дербентской впадиной и Апшеронским п-овом) с диаметром от ~ 30 до ~ 70 км. Этот вихрь и связанные с ним элементы циркуляции обеспечивают распространение трансформированных вод апвеллинга на расстояние до ~ 150 км от берега (см. рис. 6.22б). Иногда вихри примерно такого же масштаба и вихревые диполи наблюдаются и в центральной части Среднего Каспия (см. рис. 6.17б). Вихревой диполь к северо-востоку от Апшеронского п-ова с размером «шляпки» примерно 55 км виден на рис. 6.26а. Антициклоны или вихревые диполи меньшего размера (~ 20 км) обнаруживаются на конце струйного потока теплых вод из Северного Каспия вдоль п-ова Тюб-Караган (см. рис. 6.22в), на фронте теплых и распресненных вод из Северного Каспия (см. рис. 6.24в, 6.26б).

В Южном Каспии мезомасштабные антициклоны с присоединенными циклонами часто наблюдаются как над склоном южно-каспийской впадины на участке от Апшеронского п-ова до юго-восточного «угла» моря, так и в глубоководной части моря, с центрами преимущественно западнее 51° в. д. В большинстве случаев это антициклонические вихри или диполи/триполи на основе антициклона. Центры часто обнаруживаемых антициклонов над западным склоном впадины с $D \approx 30\text{--}50$ км находятся непосредственно южнее Апшеронского п-ова (см. рис. 6.22б, 6.26а, 6.27а, б), южнее устья р. Куры ($\sim 38^\circ 40'$ с. ш., $49^\circ 30'$ в. д., см. рис. 6.22б, 6.24в, 6.26а, б) и в юго-западной части моря ($\sim 37^\circ 40'$ с. ш., $49^\circ 30'$ в. д., рис. 6. 26б). Вихри с $D \approx 20\text{--}40$ км (см. рис. 6.24б, 6.26б, 6.27а) обнаруживаются вдоль южного побережья от м. Сефид-Руд до самой южной точки моря на 52° в. д. (см. также (Катунин, Сапожников, 1997; Shipilova, 2000)). По-видимому, их образование связано с резким изменением направления береговой линии и изобат. Некоторые последовательности спутниковых изображений позволяют предполагать, что вихри, образовавшиеся в районе м. Сефид-Руд, смещаются на восток (в направлении вдольбереговой циклонической циркуляции) и, возможно, сливаются. Центр часто обнаруживаемого антициклона с $D \approx 40\text{--}60$ км в юго-восточном «углу» находился в большинстве случаев на $37^\circ\text{--}37^\circ 20'$ с. ш., $52^\circ 40'$ в. д. (см. также (Катунин, Сапожников, 1997)). Нередко на его периферии видны циклонические вихри меньшего или сравнимого с ним диаметра (см. рис. 6.17б).

Более крупные антициклонические и циклонические вихри, а также вихревые диполи и их комбинации характерны для глубоководной части Южного Каспия.

Циклонический вихрь с диаметром до 70–80 км иногда отчетливо проявляется в западной части впадины (координаты центра: $\sim 38^{\circ}10' - 38^{\circ}30'$ с.ш., $50^{\circ} - 50^{\circ}30'$ в.д.) (см. рис. 6.19а, 6.27). Глубоководные антициклоны с $D \approx \sim 45 - 60$ км хорошо видны на рис. 6.19а (координаты центров: $39^{\circ}40'$ с.ш., $50^{\circ}30'$ в.д. и $38^{\circ}45'$ с.ш., $51^{\circ}20'$ в.д.), рис. 6.19б ($38^{\circ}20'$ с.ш., 51° в.д. и $39^{\circ}30'$ с.ш., $50^{\circ}40'$ в.д.), рис. 6.22б ($39^{\circ}20'$ с.ш., $50^{\circ}40'$ в.д.). Характер распределения температуры на рис. 6.24в предполагает наличие крупного антициклонического вихря ($D \approx 80$ км) с центром на $37^{\circ}50'$ с.ш., $50^{\circ}30'$ в.д. и вихревого диполя, затягивающего относительно холодные воды из Среднего Каспия. Циклоническая циркуляция часто наблюдается в районе о-ва Огурчинский (рис. 6.19б, 6.22б, 6.23б).

Сравнение последовательных спутниковых изображений (к сожалению, временной интервал между информативными снимками может превышать две недели) показывает, что вихревая картина в Южном Каспии довольно изменчива. Например, крупный циклонический вихрь на рис. 6.27, образующий сложную вихревую группу с соседними антициклонами, оказался на месте небольших элементов антициклонической завихренности, наблюдавшихся примерно месяцем ранее (см. рис. 6.26). Время его жизни (проявления в поле хлорофилла-а) составило почти месяц (примерно с 7 августа до начала сентября 2005 г.). Вовлечение вод по перифериям вихрей, в том числе вихрей на границе Среднего и Южного Каспия, обеспечивает распространение теплых (холодных) вод на север (юг).

Как и в Черном море, в Каспии существуют и мелкомасштабные вихри, в основном циклонические, обнаруживаемые на РЛИ или спутниковых фотографиях высокого пространственного разрешения (например, снимок 61А-43-076 в (Stevenson, 1989), полученный 2 ноября 1985 г. в координатах $42,5^{\circ}$ с.ш., $48,5^{\circ}$ в.д. — районе примерно 100-метровой изобаты к северо-востоку от Дербента, см. также рис. 5.23 и 5.26).

6.2.5. Области холодных вод в Южном Каспии

Интересной особенностью циркуляции вод в южной части Южного Каспия являются эпизодически появляющиеся области холодных вод с температурным контрастом до $\sim 5^{\circ}\text{C}$ относительно окружающих. На рис. 6.19б (24 октября 2005 г.) минимум температуры в такой области ($\sim 16,5^{\circ}\text{C}$) находится на $\sim 37^{\circ}50'$ с.ш., $51^{\circ}20'$ в.д., а вовлечение холодных вод мезомасштабными вихрями заметно расширяет исходную область пониженной температуры.

Аналогичное пятно холодных вод наблюдалось в этом районе (область в пределах $\sim 37^{\circ} - 38^{\circ}$ с.ш., $51^{\circ} - 52^{\circ}30'$ в.д.) 13 декабря 2003 г. (данные П. В. Люшвина). Температура вод в холодном пятне ($\sim 13,4^{\circ}\text{C}$) была примерно на 3°C ниже температуры окружающих вод ($\sim 16,4^{\circ}\text{C}$). По оценке П. В. Люшвина, холодные воды пятна имели более высокую по сравнению с окружающими прозрачность, что подтверждается среднемесячными картами концентрации хлорофилла-а (Kopelevich et al., 2005).

Наблюдения подобных эпизодически появляющихся областей холодных вод пока единичны (2003 и 2005 гг.), и природа их еще не установлена. Отметим, что в обоих случаях область холодных вод располагалась в юго-восточной части южно-каспийской впадины, проявлялась осенью (конец октября — декабрь), и воды в ней

имели пониженную концентрацию взвеси (хлорофилла-*a*). Можно предполагать, что появление подобных холодных зон связано либо с интенсивным локальным атмосферным воздействием, либо с локальными особенностями горизонтальной и вертикальной циркуляции. Заметим, что в этой области, согласно результатам моделирования (Курдюмов, Озкой, 2004), в декабре существует локальный циклонический круговорот. Температура воды ~16 °С в октябре в рассматриваемой области соответствует горизонту между 20 и 50 м, а ~13 °С в декабре — горизонту, близкому к 20 м (Косарев, Тужилкин, 1995).

6.2.6. Особенности пространственного распределения хлорофилла-*a* в связи с апвеллингом и вихревыми структурами

Кроме областей повышенной концентрации хлорофилла-*a* или взвеси, очевидным образом связанных со стоком рек (Северный Каспий, устьевые зоны Куры и рек иранского побережья), в Каспии существуют зоны пониженной/повышенной концентрации взвеси, обусловленные рассмотренными выше процессами апвеллинга и вихревой динамикой.

Для апвеллинговой зоны у восточного побережья Каспия, в отличие от зон апвеллинга в других морях и океанах, характерны низкие значения концентрации хлорофилла-*a* (см. рис. 6.19а, 6.27б) (соответствующие ИК-изображения представлены на рис. 3 работы (Востоков и др., 2002) и рис. 6.27в). Это обусловлено, по-видимому, низким содержанием нитратов и фосфатов (при повышенной концентрации кремния) в поднятых из нижележащих слоев к поверхности водах (Сапожников и др., 2003).

Высокие концентрации хлорофилла-*a* в южной части Южного Каспия в июне 2001 г. (см. рис. 6.19а, см. также (Kopelevich et al., 2005)) и в июле-сентябре 2005 г. (см. рис. 6.26, 6.27), сравнимые с таковыми в Северном Каспии, имели явно региональный характер, не связанный с поступлением богатых биогенными веществами вод из Северного Каспия вдоль западного берега моря или со стоком р. Куры и рек иранского побережья. Можно отметить, что обе области повышенной концентрации хлорофилла-*a* (в июне 2001 и августе 2005 г.) находились в юго-восточной части южно-каспийской впадины, причем в области теплых вод, не отличающихся по температуре от окружающих (см. рис. 6.27в). Нетрудно видеть также, что за две недели (с 16 августа по 1 сентября 2005 г., см. рис. 6.27) увеличился размер зоны повышенной концентрации хлорофилла-*a* и возросла сама концентрация, причем наибольшая концентрация пигмента находилась в области циклонического вихря. Особенности вертикальной циркуляции в данном районе, как и роль мезомасштабных вихрей в данном процессе требуют дальнейшего изучения.

Из областей повышенной концентрации хлорофилла-*a* в Южном Каспии можно отметить также область свала глубин в юго-восточном углу моря (см. рис. 6.26, 6.27), связанную, по-видимому, с локальными особенностями горизонтальной и вертикальной циркуляции. Повышенная концентрация хлорофилла-*a* вдоль периферии и в центре циклонического круговорота в Среднем Каспии в начале теплого сезона (см. рис. 6.19а) есть результат вовлечения этим круговоротом богатых пигментом вод из Южного и Северного Каспия (см. также (Sur et al., 2000)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спутниковых изображений разных лет показал, что мезомасштабная динамика вод Черного моря, связанная с крупномасштабной/локальной циркуляцией вод и крупномасштабным/локальным ветровым воздействием, весьма изменчива, с временными масштабами изменчивости от синоптического до межгодового. Крупные и долгоживущие (до 8 месяцев) вихри и вихревые пары (диполи) осуществляют интенсивный поперечный берегу водообмен, влияют на локальную структуру и положение ОЧТ и определяют пространственную изменчивость гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик вод.

В Каспийском море горизонтальный водообмен в летний сезон осуществляется сравнительно короткоживущими струйными потоками (апвеллингового и неапвеллингового происхождения) и мезомасштабными вихрями. Струи апвеллинга, распространяющиеся от восточного побережья на протяженном участке от м. Песчаный до о-ва Огурчинский в основном на запад и юго-запад, в период интенсивного апвеллинга обеспечивают перенос трансформированных вод апвеллинга на расстояния, сравнимые с шириной моря. Апвеллинг у западного побережья не сопровождается образованием поперечных побережью струй, и перенос апвеллинговых вод в глубоководный район осуществляется в основном мезомасштабными вихрями.

Важными механизмами водообмена летом являются также эпизодические струеобразные вторжения вод из Северного и Южного Каспия в Средний Каспий, образующиеся при определенных локальных направлениях ветра и распространяющиеся вдоль восточного побережья моря. В холодное время года поступление в Средний Каспий теплых вод из Южного Каспия и холодных из Северного Каспия происходит по периферии циклонического круговорота в Среднем Каспии.

Мезомасштабные вихри в Каспийском море, по сравнению с Черным морем, — в основном меньшего размера и с меньшим временем жизни, что связано, по-видимому, с отсутствием в Каспии такого интенсивного бароклинного потока в масштабах моря, как Основное черноморское течение. Их образование обусловлено, возможно, изменчивостью поля ветра и взаимодействием западного прибрежного течения в Среднем Каспии и течения вдоль свала глубин в Южном Каспии с неоднородностями линии берега/донной топографии.

Оптические изображения высокого разрешения (метры — десятки метров) позволили установить, что в прибрежной и глубоководной зонах Черного моря наблюдается множество спиралевидных, преимущественно циклонических, вихрей с размерами 1–20 км и временем жизни от нескольких часов до нескольких суток. Подобные вихри наблюдаются и в Каспийском море. Механизм (или механизмы) образования этих вихрей пока не ясен и требует дальнейших исследований. С учетом спонтанности их локального появления, небольших размеров и малого времени жизни, основой исследования должна быть спутниковая информация высокого пространственного разрешения. При этом необходим анализ как текущей, так и предшествовавшей динамической ситуации (крупномасштабной и мезомасштабной динамики вод) и метеорологической обстановки в районе обнаружения вихрей.

Предметом дальнейшего исследования на основе спутниковых наблюдений также должны быть физические процессы, обуславливающие эпизодическое появление областей холодных вод (осенью) и зон повышенной концентрации хлорофилла-*a*

(летом) в южной части Южного Каспия. При этом необходим сравнительный анализ сопутствующей их появлению в разные годы гидрометеорологической обстановки и локальной циркуляции вод.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-05-00097-а, 10-05-00428-а) и Программы Президиума РАН № 21.

Глава 7

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЮЖНЫХ МОРЕЙ РОССИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Важная проблема современной климатологии — выявление и прогноз долговременной изменчивости основных термогидродинамических параметров океанов и морей — уровня и температуры поверхности моря — как важнейших климатических параметров и их связи с глобальными климатическими изменениями. В рамках этой глобальной задачи представляет интерес исследование межгодовой изменчивости уровня и температуры поверхности южных морей России: Каспийского, Черного и Азовского.

7.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Общие и отличительные черты южных морей России стали формироваться в процессе их образования и дальнейшего геологического развития. Все они тектонического происхождения, «потомки» древнего пресноводного Сарматского моря. Геологическое прошлое южных морей определило и наиболее важные современные природные особенности — полную (Каспийское море) или почти полную (Черное и Азовское моря) изоляцию от Мирового океана, а также специфику их гидрологических режимов.

Водосборные бассейны южных морей вследствие своего географического положения и размеров занимают один или несколько климатических поясов и могут в большей или меньшей степени откликаться на изменения регионального климата.

Для южных морей материковый сток — один из самых существенных факторов формирования их гидрологических условий и важнейшая составляющая водного баланса. Однако степень воздействия речных вод на каждое из этих морей неодинакова. Об этом свидетельствуют различные соотношения объемов материкового стока и воды моря. Так, для Каспийского моря оно равно 1:240, Азовского — 1:8 и Черного — 1:1490 (*Добровольский, Залогин, 1982*). Из приведенных данных видно, что наиболее значим речной сток для Азовского моря, так как он занимает восьмую часть объема воды этого моря.

Материковый сток имеет непосредственную связь с режимом увлажнения на водосборе впадающих в море рек, который зависит от характера атмосферной циркуляции в районе водосбора, т.е. от климатически обусловленного процесса. К числу климатических факторов, определяющих режим увлажнения, относятся атмосферные процессы над Атлантико-Европейским сектором Северного полушария.

7.1.1. Каспийское море

Площадь водосборного бассейна Каспийского моря составляет 3500 тыс. км², что почти в 10 раз превышает площадь его акватории. При отметке уровня $-27,5$ м в Балтийской системе высот (БС)¹ она составляет 386 400 км² (Гидрометеорология..., 1992; *Kosarev*, 2005). Водосборный бассейн располагается в нескольких климатических зонах. Таким образом, изменения климата на водосборе существенно влияют на уровень Каспия.

В общей сложности, в Каспий впадают около 130 рек. Основной объем стока приносят Волга (80 %), Урал (5 %), Терек, Сулак, Самур (в сумме 5 %) и Кура (6 %). Сток рек иранского побережья, малых рек Кавказа и прочих составляет примерно 4 %. В приходной части водного баланса речной сток составляет в среднем 74–85 % (*Kosarev*, 1975; Каспийское море..., 1986; Гидрометеорология..., 1992).

Водосборный бассейн Волги (включая бассейн рек Ока и Кама) с площадью около 1360 тыс. км² имеет значительную протяженность — более чем 2000 км от Каспия до Валдайской возвышенности (Гидрометеорология..., 1992).

Среднегодовое суммарный речной сток составляет примерно 300 км³/год (*Смирнова*, 1968; *Шикломанов*, 1976; *Георгиевский*, 1982). Разница между максимальным и минимальным годовыми поверхностными притоками речных вод в море составила в прошлом столетии 240 км³. Наибольший суммарный речной сток (около 460 км³) отмечался в 1926 г., а наименьший (около 181 км³) — в 1975 г. (*Kosarev*, 1975; Каспийское море..., 1986; *Фролов*, 2003).

Поступление речного стока в море весьма неравномерно распределено по побережью. В северную часть впадают Волга, Урал и Терек, суммарный годовой сток которых дает более 85 % общего материкового стока. С запада в море несут свои воды Сулак, Самур, Кура и более мелкие реки, в сумме дающие около 9 % стока. На долю рек Иранского побережья приходится примерно 1 % берегового стока. На восточном побережье нет ни одного постоянного водотока в море. Хорошо выраженные пространственные различия поступления речных вод в Каспий — важная географическая особенность этого водоема.

К расходным составляющим водного баланса Каспийского моря относится сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. До начала 1930-х гг. в залив ежегодно поступало 20–25 км³ каспийских вод. По мере снижения уровня моря сток в залив сокращался и к концу 1970-х гг. составлял 5–10 км³ (*Kosarev*, *Kostianoy*, 2005).

¹ Уровень моря измеряется в Балтийской системе высот (БС), принятой в СССР в 1977 г. Отсчет абсолютных высот в метрах БС ведется от нуля футштока в Кронштадте. От этой отметки отсчитаны высоты опорных геодезических пунктов и уреченных постов. В настоящее время БС используется как в России, так и в ряде других стран СНГ.

В марте 1980 г. пролив, соединяющий море с заливом, был перекрыт глухой плотиной. К концу 1982 г. площадь поверхности залива уменьшилась, а к середине лета 1984 г. завершился процесс усыхания поверхностных рассолов и превращения залива в «сухое озеро» (Косарев, Костяной, 2005). В сентябре 1984 г. сток каспийских вод в залив в объеме около $1,6 \text{ км}^3$ был частично возобновлен при помощи водопропускного сооружения. В середине 1992 г., когда уровень моря повысился на 2 м по отношению к уровню 1978 г., дамбу разрушили. Сейчас в залив поступает более 16 км^3 в год (Лавров, 2000).

7.1.2. Азовское море

Площадь водосборного бассейна Азовского моря составляет 586 тыс. км^2 . Основной объем стока поставляют реки Дон и Кубань, на долю которых приходится около 85 % всей водосборной площади.

Площадь водосборного бассейна реки Дон равна $442,5 \text{ тыс. км}^2$, а длина — 1970 км. До введения в строй Волго-Донского канала из Дона в Азовское море ежегодно поступало $29,5 \text{ м}^3$ воды. После заполнения Цимлянского водохранилища в море из Дона поступает около $27,4 \text{ км}^3$ (Косарев et al., 2008b).

Кубань — вторая по величине река, впадающая в Азовское море. Площадь ее водосборного бассейна составляет 58 тыс. км^2 , а длина — 941 км. Прежде эта река впадала в Черное море юго-восточнее Таманского полуострова, но в одну из многоводных весен в XIX в. изменила русло в нижнем течении и направилась к Азовскому морю.

Остальные реки — Лозоватка, Обиточная, Берда, Кальмиус, Грузовский Еланчик, Мокрый Еланчик, Миус, Кагальник — мелководны. Реки Ея, Челбас и Бейсуг, впадающие в одноименные лиманы восточного берега моря, несут воду в основном весной, их общий сток составляет около $1,2 \text{ км}^3$ (Гидрометеорология..., 1991б).

Средняя многолетняя величина годового речного стока в Азовское море равна $37,1 \text{ км}^3$. Его максимум ($61,5 \text{ км}^3$) наблюдался в 1932 г., а минимум ($20,4 \text{ км}^3$) — в 1950 г. Сток рек, впадающих в Азовское море, с начала XX в. (с 1900 г.) до середины 1970-х годов в среднем уменьшался. Однако в периоды с 1926 по 1933 и с 1941 по 1943 гг. значения суммарного стока значительно превосходили норму. Выделяется также исключительно маловодный период с 1972 по 1976 г., в течение которого суммарный сток оценивался не более чем в 26 км^3 , что составляло примерно половину от многолетней нормы. С конца 1970-х гг. по настоящее время наблюдается увеличение стока рек Дон и Кубань в Азовское море (Бочков, Иванова, 1972; Косарев et al., 2008b, Дроздов, 2010).

Речной сток поступает в море неравномерно в пространстве и во времени. Наибольшее количество (свыше 60 %) воды приносит Дон в Таганрогский залив, т. е. в крайнюю северо-восточную часть. Кубань, дающая морю примерно 30 % речной воды, впадает в юго-восточную часть моря. Следовательно, практически вся речная вода вливается в восточную половину моря, тогда как на остальных пространствах речной сток отсутствует. Подавляющая часть речного стока приходится на весенне-летний сезон. Однако после зарегулирования Дона и Кубани количественно изменилось сезонное распределение стока. Если до этого на весну приходилось более 60 %

годового стока, а на лето всего 15 %, то после строительства гидроузлов на реках доля весеннего стока уменьшилась до 40 %, а летнего увеличилась до 20 % (Гидрометеорология..., 1991б).

Через мелководный Керченский пролив водообмен между Азовским и Черным морями осуществляется иначе, чем через глубоководные проливы. В зависимости от сезона и более всего от ветра в Керченском проливе наблюдается в основном только азовоморская (при ветрах северных направлений) или только черноморская (при южных ветрах) вода (Гидрометеорология..., 1991б).

Годовой приток черноморских вод через Керченский пролив в среднем составляет 36–38 км³, а сток азовоморских вод в Черное море — 53–55 км³. Водообмен с заливом Сиваш через пролив Тонкий невелик: сток азовоморской воды в залив в год составляет около 1,5 км³, приток сивашских вод в Азовское море — 0,4 км³ (Цурикова, Шульгина, 1964).

7.1.3. Черное море

Площадь водосбора рек черноморского бассейна — около 1875 тыс. км² (из них примерно 216 тыс. км² — площадь с незначительным стоком) (Гидрометеорология..., 1991а). Средний многолетний речной сток за период с 1923 по 1998 г. составил 336 км³/год (Горячкин, Иванов, 2006; Kosarev et al., 2008a).

Наибольший сток дают: Дунай (по средним многолетним данным, около 201 км³), Днепр (примерно 52 км³), Днестр (около 10 км³), Южный Буг (более 2 км³) и Инглу (примерно 0,2 км³). Всего реки северо-западной части сбрасывают в море 270 км³ воды в год. Реки Крымского побережья дают около 4 км³, а реки кавказского побережья за это время приносят в море 43 км³. Сток рек турецкого побережья оценивается в 25–26 км³, а рек болгаро-румынских берегов — 3 км³. Из приведенных данных видно, что почти 80 % суммарного речного стока поступает в северо-западную часть моря. Сравнительно много речной воды получает море вдоль Кавказских берегов (Булаков, Юркова, 1998; Джаошвили, 2003).

Анализ данных о месячных и годовых значениях суммарного речного стока в Черное море за многолетний период указывает на отсутствие значимого воздействия антропогенного фактора (Гидрометеорология..., 1991а). Важным является, по-видимому, изменение климата, влияющее на увлажненность водосбора моря. В период 1860–2008 гг. сток Дуная увеличивался при заметной межгодовой изменчивости в среднем с положительным трендом 0,126 км³/год (Рева, 1997; Горячкин, Иванов, 2006; Mikhailov, Mikhailova, 2008).

7.2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ МОРЕЙ

Колебания уровня моря отличаются широким амплитудно-частотным спектром (Герман, Левиков, 1988). Разные составляющие колебаний обусловлены разными физическими процессами, поэтому слежение за изменением уровня в прибрежной зоне и на

открытой акватории морей требуют специально организованных систематических измерений. Во всех приморских странах организована национальная сеть постоянных береговых и островных уровенных постов (ИОС, 2006).

7.2.1. Современные вертикальные движения земной коры

Важной проблемой, возникающей при оценке межгодовой или климатической изменчивости уровня моря по данным уровенных постов, является влияние современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК).

Скорости современных вертикальных движений земной коры на побережье Каспийского моря не превышают 1 см/год. На большей части каспийского побережья они варьируются в пределах +0,2...0,5 см/год, на Среднем Каспии примерно равны +0,3 см/год (*Победоносцев*, 1972). Для некоторых уровенных постов на побережье Каспийского моря скорость СВДЗК составляет: –0,14 см/год для Махачкалы, –0,09 см/год для Форта Шевченко, –1,10 см/год для Баку и –0,01 см/год для Туркменбаши (Красноводск).

Северо-западное побережье Азовского моря опускается со средней скоростью –0,08 см/год (–0,06 см/год — Таганрог; –0,05 см/год — Белосарайская коса; –0,15 см/год — Приморск; –0,03 см/год — Геническ). Средняя скорость СВДЗК на юго-восточном побережье в среднем близка к –0,05 см/год (–0,04 см/год — Темрюк-порт; –0,07 см/год — Должанская). Особо следует выделить район поселка Ачуево (–0,40 см/год) и район дельты р. Дон (–0,20 см/год) (*Карта...*, 1971).

Северо-западное Причерноморье представляет собой область современных опусканий со скоростями –0,15...–0,18 см/год (*Лилиенберг* и др., 1972). Максимальные величины скорости СВДЗК (подъем) в юго-западной части Черного моря зафиксированы в Варне и Бургасе: за период 1928–1980 гг. они составили соответственно +1,07 и +0,73 см/год (*Trifonova, Demireva*, 2003). Выполненные в работах (*Горячкин, Иванов*, 2006; *Горячкин*, 2008) оценки скорости вертикальных движений земной коры для периода 1927–1990 гг. показывают, что повсюду скорости вертикальных движений невелики. Они варьируются вокруг величины +0,1 см/год, за исключением района Одессы и Колхидской низменности, где они равны –0,51 и –0,62 см/год соответственно (*Каталог...*, 1990). Побережье Крыма погружается со средней скоростью –0,14 см/год (–0,1 см/год — Черноморское; –0,12 см/год — Евпатория; –0,14 см/год — Алушта; –0,31 см/год — Керчь) (*Багрова* и др., 2001). Вертикальные движения имеют микро-ритмы, период которых определяется несколькими годами (*Захаров*, 2006).

7.2.2. Дистанционные измерения уровня морей

Среди дистанционных методов определения уровня моря в первую очередь следует выделить спутниковую альтиметрию как основной инструмент исследования изменчивости уровня по всей акватории внутренних морей, а не только у побережья. Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования поверхности Земли с борта космического аппарата. Более подробно ознакомиться с методом спутниковой альтиметрии можно в разд. 2.2.

Основные программы спутниковой альтиметрии можно условно разделить на два типа. Первые направлены на решение геодезических задач: уточнение формы и высот геоида и гравитационного поля Земли (они получили название геодезических программ), вторые — на осуществление мониторинга изменчивости высоты морской поверхности (ВМП). Круг задач, которые могут решаться в рамках этих программ, достаточно широк — от различных океанологических задач до исследований глобальных изменений климата. Эти программы получили название изомаршрутных, поскольку предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период (цикл) времени. Они дают возможность реализовать режим повторных измерений по сетке равномерно расположенных по поверхности Земли треков. Изомаршрутные программы направлены в первую очередь на решение задач мониторинга пространственно-временной изменчивости ВМП или уровня океана.

Основные преимущества зондирования подстилающей поверхности в микроволновом диапазоне связаны с высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу, в результате чего наблюдения могут проводиться в любое время суток, практически в любую погоду, при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Это справедливо не только для спутниковой альтиметрии, но и для других активных методов дистанционного зондирования. Кроме этого, спутниковая альтиметрия позволяет измерять высоты морской поверхности относительно центра масс Земли, что дает возможность исключить СВДЗК из межгодового хода изменения уровня.

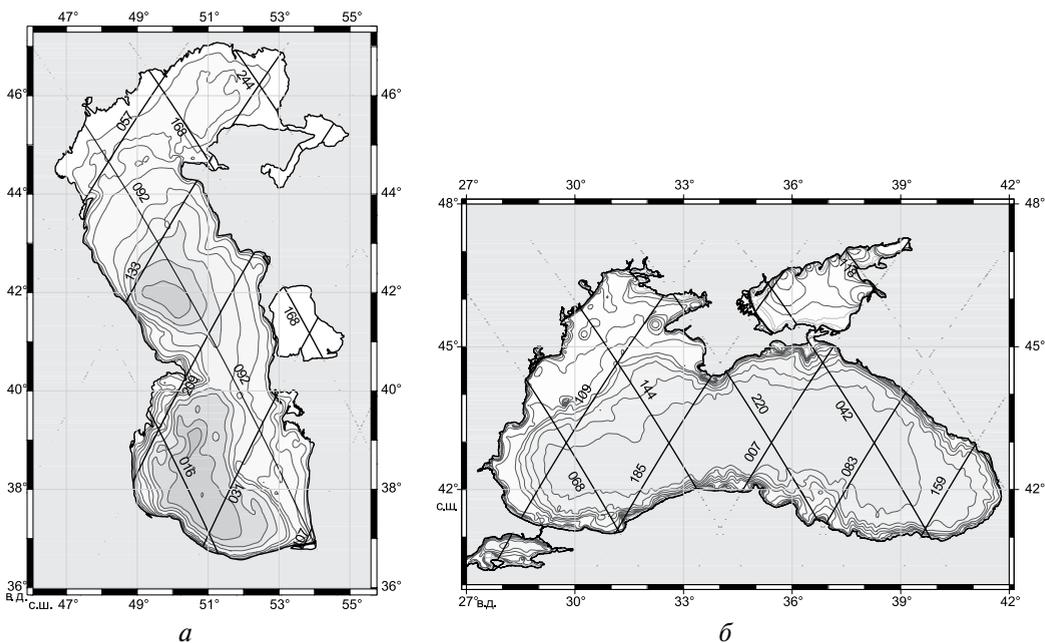


Рис. 7.1. Расположение треков изомаршрутных программ спутников Т/Р и J1/2 на акватории Каспийского (а) и Черного и Азовского (б) морей. Здесь и далее береговая линия Каспийского моря соответствует 1934 г., когда отметка уровня моря составляла $-26,46$ м в БС

Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости уровня южных морей использовались данные спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason 1/2 (J 1/2). Этот выбор обусловлен следующими причинами.

Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этой программы составляет 1,7 см (*Fu, Pihos*, 1994), а расчет самой высоты морской поверхности относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана — 4,2 см (*Chelton et al.*, 2001), что стало наилучшей характеристикой по сравнению с другими программами альтиметрических измерений.

Внутри каждого 10-суточного цикла на акватории Каспийского моря расположено 4 нисходящих (четные номера) и 4 восходящих (нечетные номера) треков (рис. 7.1а, см. с. 366), Азовского моря — 2 нисходящих трека и 1 восходящий и Черного моря — 4 нисходящих и 5 восходящих треков (рис. 7.1б, см. с. 366). Это позволяет анализировать изменчивость уровня вдоль треков с пространственным разрешением 5–6 км. Временной масштаб повторения измерений вдоль трека — 9,916 сут (т. е. примерно 3 раза в месяц или 6 раз в месяц в точках пересечения треков) — наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровней Каспийского, Азовского и Черного морей.

Массив данных Т/Р представляет собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.) с возможностью его продления данными спутника Jason-1 (с января 2002 по февраль 2009 г.) и Jason-2 (с августа 2008 г. по настоящее время). Расположение треков последнего полностью совпадает с расположением треков спутников Т/Р и Jason-1 до совершения ими маневра коррекции орбиты соответственно 19 августа 2002 г. и 26 января 2009 г.

7.2.3. Методика обработки данных

Обработка и интерпретация данных спутниковой альтиметрии проводились с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии, разработанной в Геофизическом центре РАН (*Лебедев*, 1996; *Medvedev et al.*, 1997; *Лебедев, Медведев*, 2000; *Лебедев, Костяной*, 2004; 2005). Временной анализ с января 1993 по декабрь 2009 г. по данным спутниковой альтиметрии проводился по анализу изменчивости высоты морской поверхности в точках пересечения восходящих и нисходящих треков.

Как и в работах (*Лебедев, Костяной*, 2004; 2005) для Каспийского моря рассматривались 2 точки пересечения в северной его части (092-057 и 244-133), 2 точки в центральной (092-133 и 092-209) и 3 точки в южной части (016-209, 016-031 и 092-031) (см. рис. 7.1а).

На акватории Азовского моря единственная точка пересечения 042-185 расположена близко к береговой линии. Поэтому для анализа временной изменчивости уровня моря выбирались точки, расположенные на 042 и 118 треках и равноудаленные от береговой линии (см. рис. 7.1б).

Для Черного моря были выбраны 2 точки пересечения в западной части (068-109 и 144-185) и 2 точки в восточной части (220-007 и 082-083) (см. рис. 7.1б). Точки пересечения 068-185 и 220-083 располагались близко к побережью, поэтому в расчетах изменчивости уровня Черного моря в целом не рассматривались. Точка пересечения

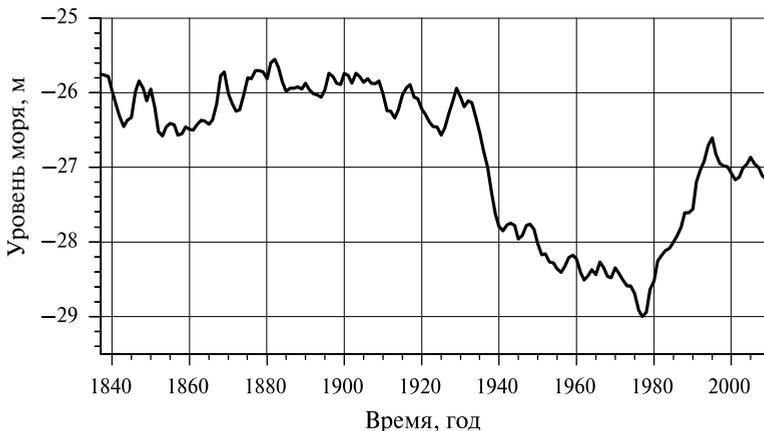
144-109 находится в северо-западной мелководной части моря, которая имеет особый гидродинамический режим (Гидрометеорология..., 1991a). По этой причине она также не использовалась в расчетах.

Пространственная изменчивость скорости изменения уровня южных морей исследовалась на основании анализа средних высот морской поверхности (Лебедев, Костяной, 2005). Для каждого моря строилась своя модель СВМП, которая представляла собой временные ряды изменчивости высоты морской поверхности вдоль каждого трека. Из этих данных путем осреднения были удалены синоптическая и сезонная изменчивость ВМП. После выделения характерных временных интервалов изменчивости уровня морей на начало и конец каждого периода строились среднегодовые СВМП, разность которых и давала возможность провести анализ пространственной изменчивости скорости изменения уровня каждого моря.

7.3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ЮЖНЫХ МОРЕЙ

7.3.1. Каспийское море

Инструментальные измерения уровня Каспийского моря и систематические наблюдения за его колебаниями ведутся с 1837 г. На рис. 7.2 приведен многолетний ход уровня Каспийского моря по данным уровенных постов с 1837 по 2009 г. В многолетнем ходе уровня Каспийского моря можно выделить несколько характерных периодов: 1900–1929 гг., 1942–1969 гг. и 1995–2009 гг. — относительной стабильности или умеренного понижения, 1930–1941 гг. и 1970–1977 гг. — резкого понижения и 1978–1995 гг. — резкого повышения.



Р и с . 7.2. Межгодовая изменчивость уровня Каспийского моря с 1837 по 2009 г. по данным инструментальных измерений на уровенных постах

За последнее столетие самый высокий уровень воды в Каспии зарегистрирован в 1900 г. ($-25,7$ м в БС), а самый низкий — в 1977 г. ($-29,0$ м в БС). Для стабилизации уровня были приняты определенные хозяйственные меры, в частности, отделение залива Кара-Богаз-Гол глухой дамбой в марте 1980 г. Однако к этому времени (1980–1981) вследствие естественных климатических причин уровень Каспия уже повысился на 40–50 см (Терзиев, Никонова, 2003; Kosarev, Kostianou, 2005). Это произошло в результате изменения климата в Атлантико-Европейском секторе с преобладанием западной формы атмосферной циркуляции. При этом значительно увеличилась увлажненность, увеличились суммы осадков и водность рек. С 1978 г. ежегодный подъем уровня составлял от 14 до 30 см. В результате с 1977 по 1995 г. уровень моря поднялся на 2,4 м, а его абсолютное значение достигло $-26,6$ м в БС.

С сентября 1992 г. по настоящее время изменчивость уровня Каспийского моря хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (рис. 7.3). Результаты расчетов показали, что этот временной период можно разделить на пять интервалов. С зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки $-26,4$ м в БС со скоростью $19,93 \pm 2,14$ см/год. Затем до зимы 1997/1998 г. наблюдалось очередное резкое понижение до отметки $-27,1$ м в БС со скоростью $22,17 \pm 2,45$ см/год. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 г. до отметки $-27,4$ м со скоростью $5,89 \pm 1,09$ см/год. Последующий умеренный рост до отметки $-26,7$ м со скоростью $9,92 \pm 1,78$ см/год наблюдался до лета 2005 г. (Лебедев, Костяной, 2004, 2005). С лета 2005 г. по зиму 2009/2010 г. уровень моря умеренно падал до отметки $-27,3$ м со скоростью $7,96 \pm 1,23$ см/год. Это падение наблюдается и в настоящее время.

Сравнение расчетов по данным уровенных постов и спутниковой альтиметрии показало хорошее соответствие полученных результатов. Для временного интервала 1993–2009 гг. коэффициент корреляции составил от 0,74 до 0,98 (Лебедев, Костяной, 2004, 2005).

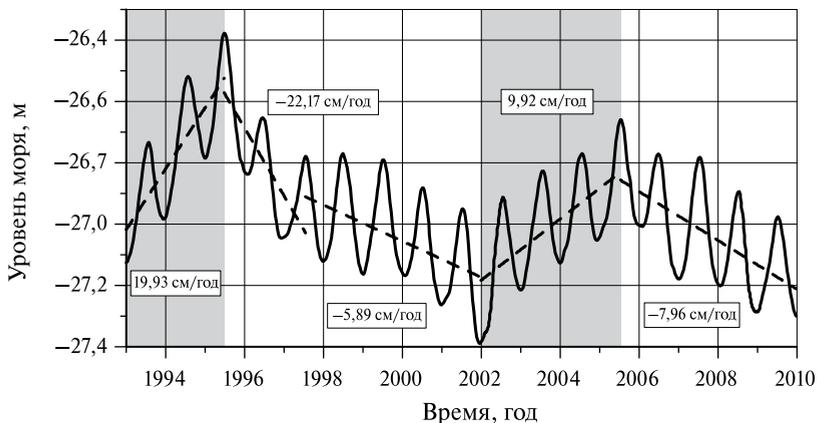


Рис. 7.3. Изменчивость уровня Каспийского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды роста выделены серым цветом

Анализ изменчивости СВМП для Каспийского моря показал, что уровень моря рос и падал не равномерно по акватории моря (рис. 7.4, см. с. 371–372). В период с 1993 по 1995 г. максимальная скорость подъема уровня Каспийского моря более 20 см/год наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 7.4а), а также в районе восточной части Апшеронского порога. Однако севернее него на свале глубин 200–300 м скорость роста не превышала 14–16 см/год. Аналогичная скорость подъема уровня Каспийского моря наблюдалась в районе пролива, соединяющего море с заливом Кара-Богаз-Гол. Столь малая скорость подъема уровня моря, судя по всему, объясняется тем, что после взрыва в 1992 г. плотины, отделявшей залив от моря, имел место процесс активного заполнения залива морской водой. Уровень залива в это время поднимался со скоростью $168,5 \pm 5,23$ см/год (Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, Kostianoy, 2008a; Костяной и др., 2011; Kouraev et al., 2011) В восточной части Северного Каспия восточнее Уральской бороздины скорость подъема уровня в среднем составила 6–14 см/год, а в западной части дельты Волги и у побережья Калмыкии и Дагестана — более 18 см/год. Вдоль побережья Ирана и южного побережья Азербайджана скорость падения не превысила 2–12 см/год.

В период резкого падения уровня Каспия (1995–1997) максимальная скорость падения более 22 см/год также наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 7.4б), восточной части Апшеронского порога и вдоль восточного побережья, отделяющего море от залива Кара-Богаз-Гол. Аналогичные скорости падения уровня наблюдались в западной части Северного Каспия и в его восточной части в районе Уральской бороздины. Вдоль побережья Ирана и южной части побережья Азербайджана скорость падения не превысила 2–10 см/год. Невысокие скорости снижений уровня моря наблюдались и у восточного побережья Северного Каспия (4–10 см/год).

Для следующего временного интервала 1997–2001 гг., характеризующегося умеренным падением уровня Каспийского моря, пространственная неоднородность скорости падения уровня показана на рис. 7.4в. Скорость более 8 см/год наблюдалась в северной части Апшеронского порога, а также вдоль всего побережья Апшеронского полуострова. В Южном Каспии восточнее Ленкоранской впадины на свале глубин 500–700 м наблюдается максимальная скорость падения уровня Каспийского моря (более 9 см/год). В восточной части Апшеронского порога скорость падения не превысила величину 4–5 см/год. Аналогичная скорость наблюдалась в Северном Каспии и вдоль южной части побережья Азербайджана. Минимального значения (менее 3 см/год) она достигла в Туркменском и Красноводском заливах.

Следующий период умеренного роста уровня Каспийского моря (2001–2005) (рис. 7.4г) характеризовался скоростью подъема уровня более 12 см/год в районе Ленкоранской впадины и в северо-восточной части Среднего Каспия севернее Апшеронского порога. Большие скорости роста (9–10 см/год) наблюдались также в западной части Северного Каспия, прилегающей к дельте Волги, и в его восточной части. Вдоль побережья Азербайджана, Ирана и Туркменистана ее величина не превысила 7–8,5 см/год.

Наблюдающееся с 2005 г. умеренное падение уровня Каспия (рис. 7.4д) также имеет неравномерное распределение скорости падения уровня моря. Максимальных значений (более 9 см/год) она достигает в Южном Каспии (на свале глубин более 700 м, юго-восточнее Апшеронского порога и западнее центральной части побережья Туркменистана) и в Северном Каспии в районе западной части дельты Волги и севернее Мангышлакского залива.

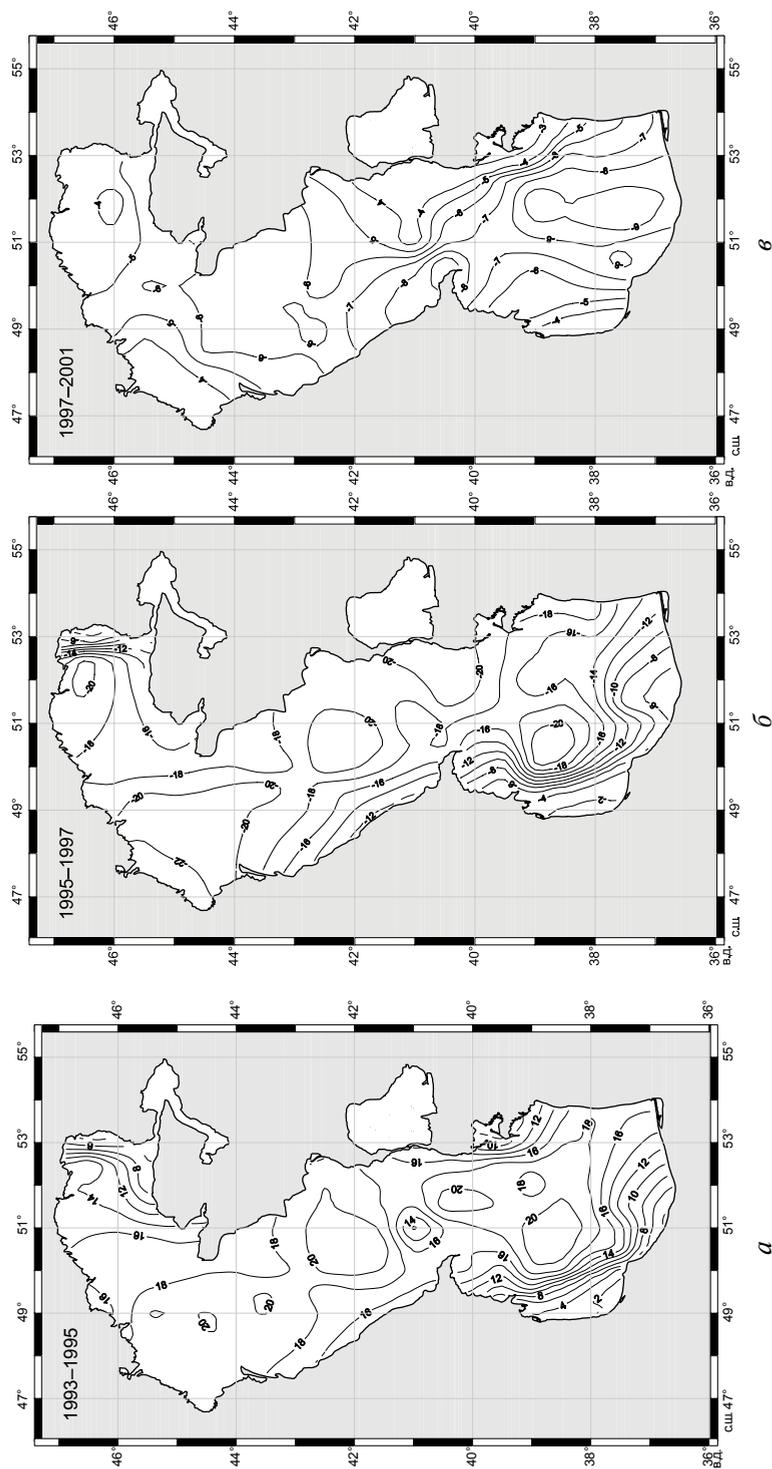


Рис 7.4а–в. Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения аномалий уровня Каспийского моря (см/год) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 для разных временных интервалов: а — 1992–1995 гг. (резкий рост); б — 1995–1997 гг. (резкий спад); в — 1997–2001 гг. (умеренное падение)

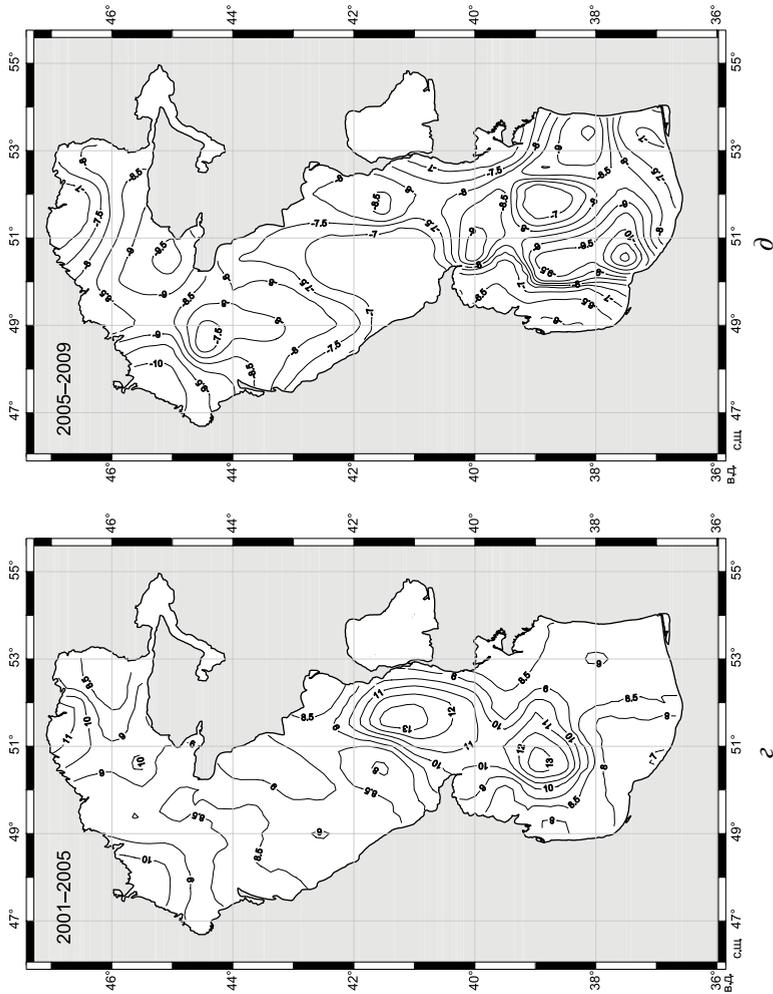


Рис 7.4г, д. Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения аномалий уровня Каспийского моря (см/год) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 для разных временных интервалов: г — 2001—2005 гг. (умеренный рост); д — 2005—2009 гг. (умеренное падение)

В центральной части моря скорость падений уровня лежит в интервале от 7 до 8,5 см/год. По сравнению с предыдущими периодами падения уровня (1995–2001) скорость падения уровня вдоль побережья Ирана максимальна и составляет величину 7–9 см/год.

Таким образом, можно выделить районы, в которых наблюдаются максимальные скорости падения или роста уровня. В первую очередь это западная часть дельты Волги, районы Апшеронского порога, Дербентской и Ленкоранской впадин и Уральской бороздины.

7.3.2. Азовское море

По данным дистанционного зондирования, аномалии уровня или уровень Азовского моря имеют тенденцию к увеличению со средней скоростью $1,39 \pm 0,21$ см/год в 1993–2009 гг. (рис. 7.5). За 1993–1994 гг. уровень моря понижался со скоростью $13,14 \pm 1,71$ см/год. Так же, как и в Черном море, с 1995 до 1999 г. уровень Азовского моря имел устойчивую тенденцию повышения со скоростью $3,12 \pm 0,99$ см/год. Далее он уменьшался до 2002 г. со скоростью $3,96 \pm 1,07$ см/год, а затем опять начал резко увеличиваться до весны 2004 г. со скоростью $12,77 \pm 2,31$ см/год. Следующий период падения начался с весны 2004 г. и продолжался до зимы 2007/2008 г. Скорость падения в этот период составила $8,94 \pm 1,53$ см/год. Далее уровень Азовского моря рос со скоростью $6,78 \pm 1,11$ см/год до конца 2009 г.

Полученные результаты не противоречат расчетам по данным уровенных постов на российском побережье Азовского моря (Филиппов, 2009).

К сожалению, пространственное распределение треков альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 по акватории Азовского моря (см. рис. 7.1б) не позволяет провести пространственный анализ изменчивости скорости падения и роста уровня моря.

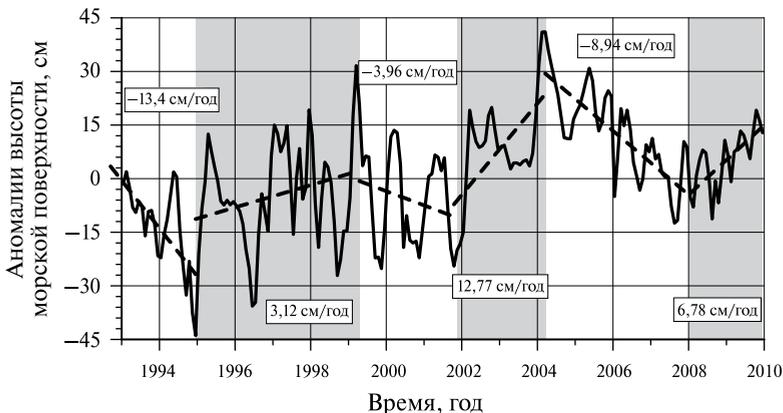


Рис. 7.5. Изменчивость аномалий уровня Азовского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды роста выделены серым цветом

7.3.3. Черное море

Уровень Черного моря, как и любого другого внутреннего бассейна, имеет ярко выраженную сезонную изменчивость, обусловленную в первую очередь речным стоком (в основном стоком Дуная и Днепра). Сезонная изменчивость уровня моря в среднем не превышает 20 см (Гидрометеорология..., 1991а). Однако из-за географического положения и большой площади водосбора Черного моря эта изменчивость подвержена влиянию климатических изменений. За последние сто лет уровень Черного моря, по данным уровенных постов, повысился на 20 см (Гидрометеорология..., 1991а).

С начала наблюдений на уровенных постах (с 1875 г.) до 20-х гг. XX столетия уровень Черного моря был относительно стабильным с небольшой тенденцией к понижению. С середины 1920-х гг. до 1985 г. наблюдалось повышение уровня со скоростью $0,18 \pm 0,07$ см/год (Рева, 1997; Горячкин, Иванов, 2006). В частности, в Туапсе с 1917 по 2002 г. уровень повышался со средней скоростью $0,23$ см/год (Kosarev et al., 2008a).

О межгодовой изменчивости уровня в Черном море в 1993–2009 гг. можно судить по временному ходу аномалий уровня моря, представленному на рис. 7.6, который рассчитан по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2. Эта изменчивость характеризуется подъемом уровня в 1993–1999, 2003–2005 и 2008–2009 гг. и спадом его в 1999–2003 и 2005–2007 гг. В среднем для 1993–2009 гг. характерен подъем уровня Черного моря со скоростью $0,57 \pm 0,11$ см/год. Результаты расчетов показали, что за период с января 1993 по июнь 1999 г. уровень моря рос со скоростью $2,64 \pm 0,31$ см/год. В последующие пять лет (с июня 1999 по апрель 2003 г.) происходило небольшое падение уровня со скоростью $1,23 \pm 0,02$ см/год. Это хорошо согласуется с результатами других расчетов (Vigo et al., 2005). Согласно им, с 1993 по 1999 г. скорость повышения уровня Черного моря в целом составляла $2,94 \pm 0,9$ см/год, а с 1999 по 2001 г. уровень уменьшался со скоростью $1,7 \pm 0,8$ см/год. Новый период роста уровня (примерно на 20 см) наблюдался с апреля 2003 по июнь 2004 г.

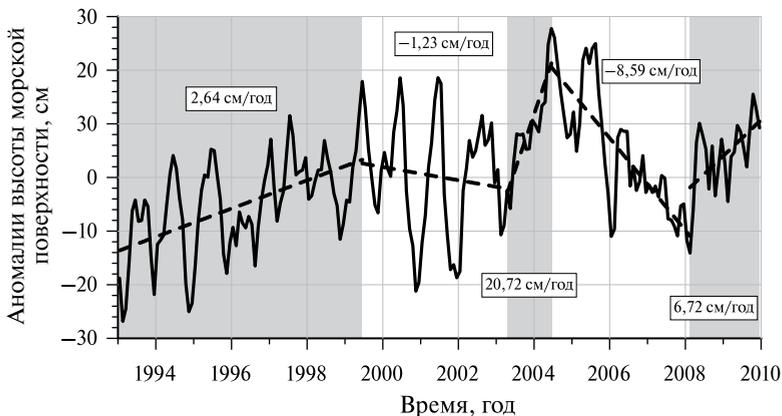


Рис. 7.6. Изменчивость аномалий уровня Черного моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды роста выделены серым цветом

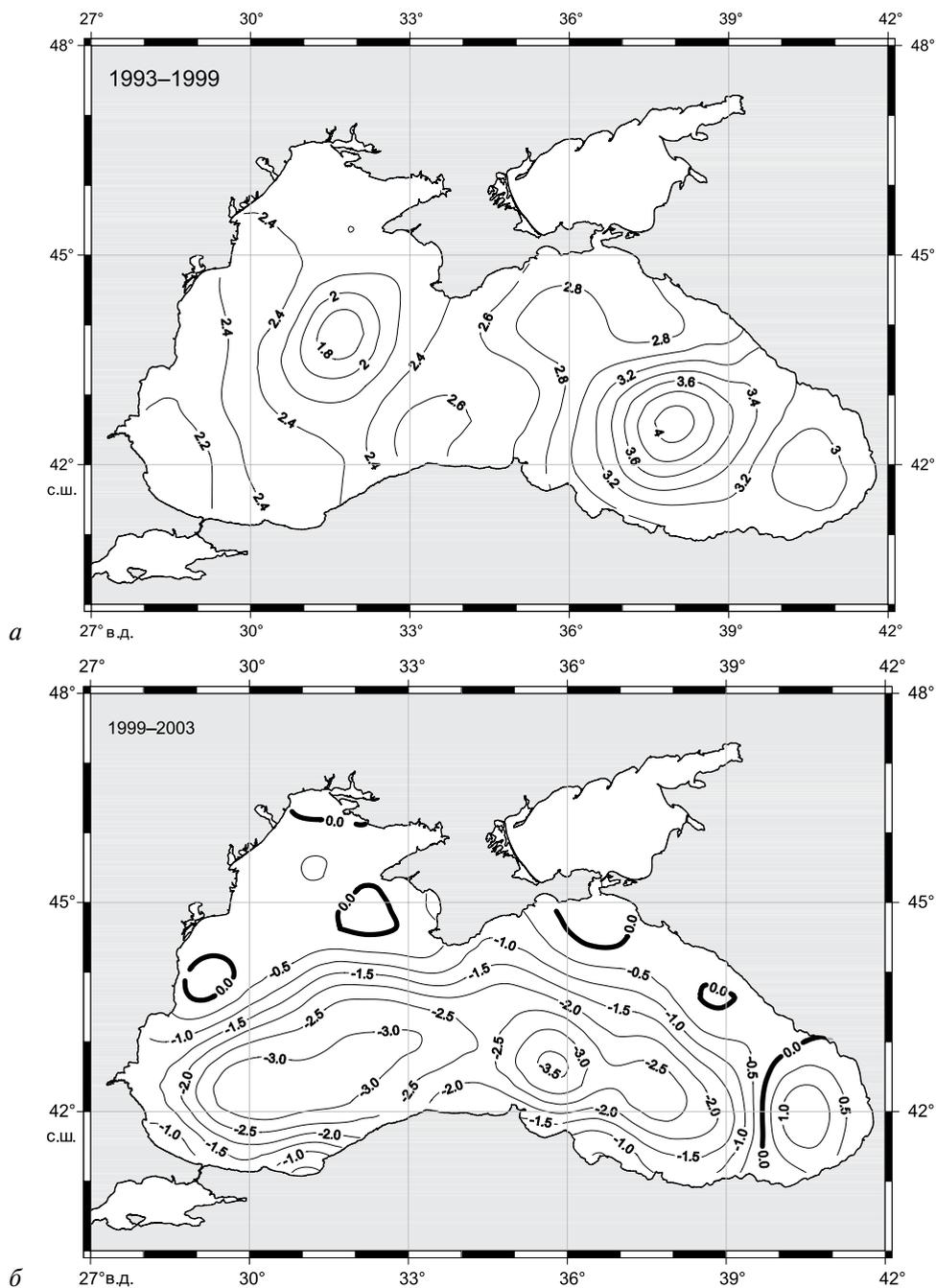


Рис. 7.7а, б. Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения аномалий уровня Черного моря (см/год) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 для разных временных интервалов: а — 1993–1999 гг. (рост уровня); б — 1999–2003 гг. (понижение)

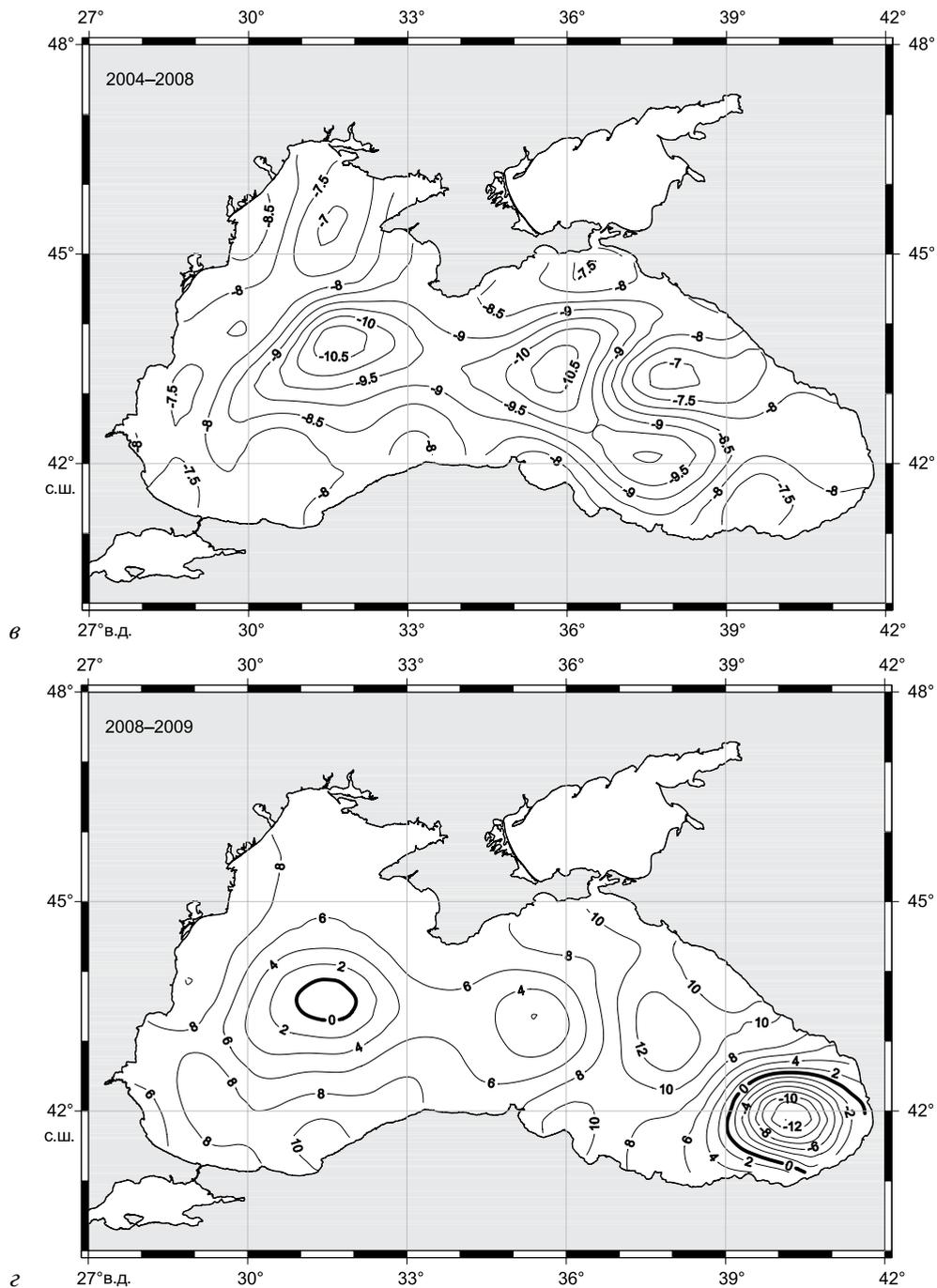


Рис. 7.7в, г. Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения аномалий уровня Черного моря (см/год) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 для разных временных интервалов: в — 2004–2008 гг. (понижение); г — 2008–2010 гг. (рост)

Затем с июня 2004 по февраль 2008 г. уровень опять понижался со скоростью $8,59 \pm 0,65$ см/год. С февраля 2008 по декабрь 2009 г. уровень Черного моря рос со скоростью $6,72 \pm 0,32$ см/год.

Сравнение оценок изменения уровня моря по данным уровенных постов и спутниковой альтиметрии показало их хорошее соответствие. Для временного интервала 1993–1995 гг. коэффициент корреляции составил от 0,73 до 0,83 (Korotaev et al., 2001).

Согласно проведенному анализу пространственной изменчивости скорости роста уровня Черного моря в период с 1993 по 1999 г. (рис. 7.7а, см. с. 375), максимальная скорость (3,6–4,2 см/год) подъема уровня наблюдалась в области Восточного циклонического круговорота (рис. 7.8). По-видимому, это связано с увеличением антициклонической активности в восточной части моря (см. гл. 6). Действительно, по крайней мере в 1993, 1998 и 1999 гг. в этом регионе существовали долгоживущие (до 5–8 мес) глубоководные антициклонические вихри (см., например (Гинзбург и др., 2003; Zatsepin et al., 2003)). Скорость роста (2,0–2,4 см/год) уровня в юго-западной части Черного моря на рис. 7.7а обусловлена в первую очередь увеличением стока Дуная. Небольшая скорость подъема уровня (менее 3 см/год) наблюдалась также и в юго-восточной части моря или в Батумском регионе (см. рис. 7.8).

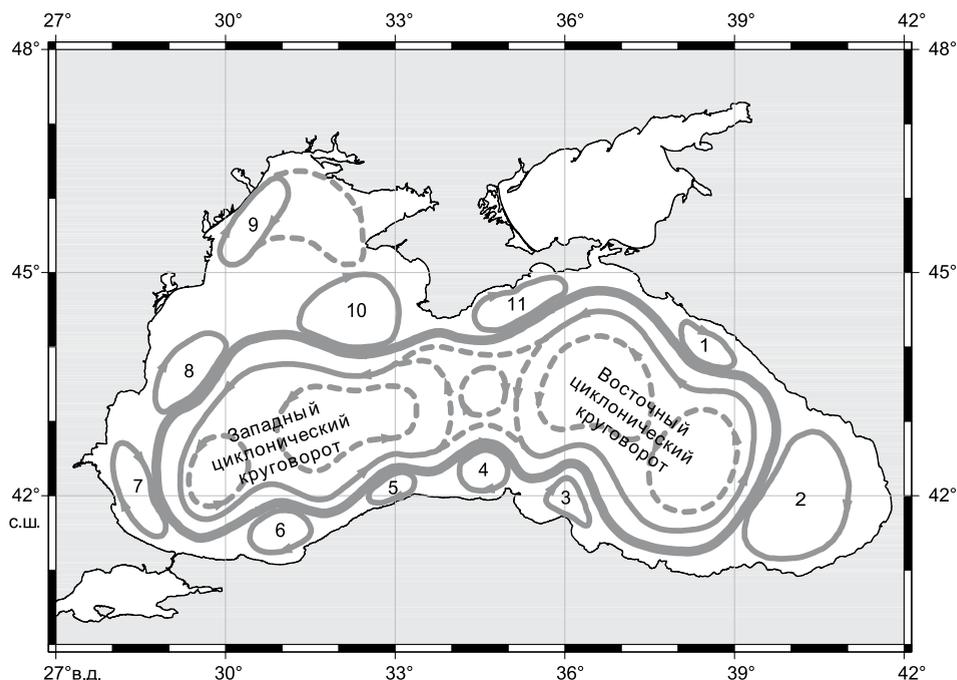


Рис. 7.8. Обобщенная схема циркуляции Черного моря (Oguz et al., 1993; Korotaev et al., 2001). Цифрами обозначены районы наиболее частого наблюдения антициклонических вихрей: 1 – Кавказский, 2 – Батумский, 3 – Кизилирмакский, 4 – Синопский, 5 – Амасринский, 6 – Сакарыйский, 7 – Босфорский, 8 – Калиакрский, 10 – Севастопольский, 11 – Крымский. Сплошная толстая линия – Основное черноморское течение

Период с 1999 по 2003 г., как уже отмечалось, характеризовался падением уровня Черного моря (рис. 7.7б, см. с. 374). Однако в некоторых областях уровень моря с небольшой скоростью рос. Так, например, в районе, прилегающем к Керченскому проливу, наблюдалась скорость подъема более 0,2 см/год. В Калиакрском, Севастопольском и Кавказском регионах (см. рис. 7.8) скорость роста уровня составила незначительную величину — чуть более 0,1 см/год, тогда как в Батумском — более 0,5 см/год. В целом пространственная изменчивость скорости понижения уровня Черного моря очень хорошо коррелирует с обобщенной схемой циркуляции (см. рис. 7.8). В районе Основного черноморского течения (ОЧТ) уровень снижался в пределах 1,0–1,5 см/год, а в районах восточного и западного циклонических круговоротов — 2,5–3,5 см/год.

В период умеренного снижения с 2004 по 2008 г. (рис. 7.7в, см. с. 375) наибольшие скорости 9–11 см/год наблюдались в районе Западного и Восточного циклонических круговоротов. Рост уровня Черного моря в период с февраля 2008 по декабрь 2009 г. наблюдался не по всей акватории Черного моря (см. рис. 7.7г, см. с. 375). Так, в Батумском регионе, можно сказать, уровень падал со скоростью до 12 см/год.

7.4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЮЖНЫХ МОРЕЙ

7.4.1. Используемые данные и регионы исследования

Массивы гидрологических измерений разных лет, собранных в основном до конца 1980-х — начала 1990-х гг. на гидрологических станциях с неравномерным пространственным и временным покрытием акваторий и береговых гидрометеорологических станциях, стали основой построения среднесезонного (климатического) распределения температуры поверхности моря (ТПМ) в разные месяцы для Каспийского (например, *Косарев, Тужилкин*, 1995; *Tuzhilkin, Kosarev*, 2005), Черного (например, *Гидрометеорология...1991а; Belokopytov*, 1998) и Азовского (*Гидрометеорология..., 1991б; Matishov et al.*, 2006) морей. Однако этих данных и результатов продолжающихся в настоящее время несистематических и региональных измерений недостаточно для исследования межгодовой изменчивости среднегодовых (среднесезонных, среднемесячных) температур поверхностного слоя в масштабах всего моря или его отдельных регионов. Такие исследования могут базироваться только на непрерывно пополняемых массивах глобальных спутниковых данных с равномерным покрытием исследуемой акватории. Эффективность использования спутниковых данных для исследования долговременной изменчивости ТПМ в Черном и Каспийском морях продемонстрирована во многих работах (*Ginzburg et al.*, 2004, 2005, 2008а; *Бабий и др.*, 2005; *Kazmin, Zatsepin*, 2007; *Гинзбург и др.*, 2004, 2008б, 2009; *Костяной и др.*, 2008; *Пиотух и др.*, 2009).

Сведения о характере сезонной и межгодовой изменчивости ТПМ южных морей и их регионов, основанные на спутниковых данных, ограничены на сегодняшний

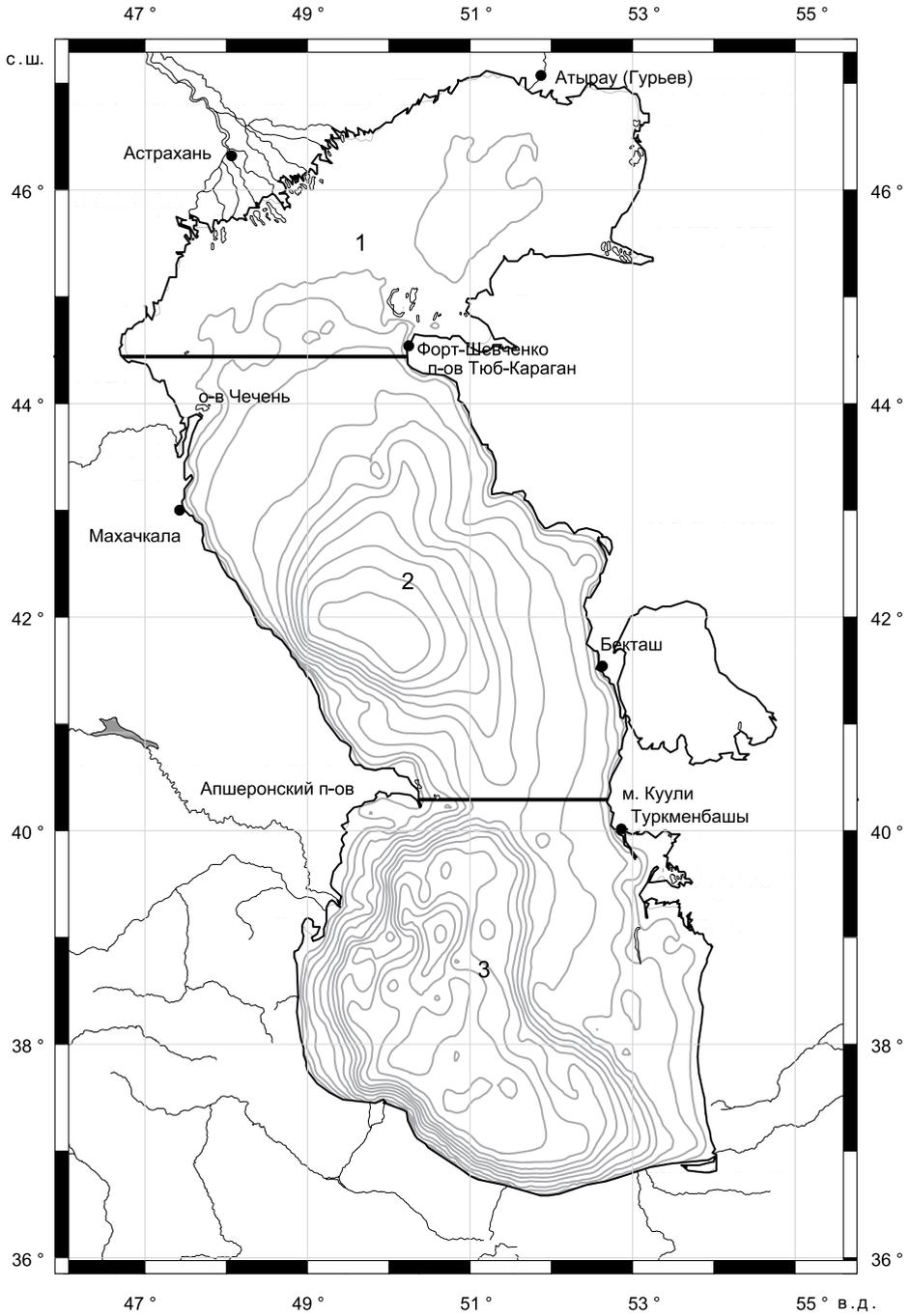
день 2000-м годом для Каспийского моря (*Гинзбург* и др., 2004; *Ginzburg et al.*, 2005) и 2006-м годом для Черного (*Гинзбург* и др., 2009); для Азовского моря они отсутствуют. Информация о межгодовой изменчивости среднегодовой ТПМ Азовского моря со второй половины 1920-х гг. до 2000 г., по результатам измерений в прибрежных районах моря, содержится в работах (*Matishov et al.*, 2006; *Дашкевич*, 2008).

В работах разных лет для исследования изменчивости ТПМ Черного и Каспийского морей использовались различные доступные через Интернет спутниковые массивы данных, основанные на обработке одних и тех же измерений инфракрасных (ИК) каналов радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) спутников NOAA, но с применением различных алгоритмов обработки. Это массивы MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature), доступные с ноября 1981 г., и проекта Pathfinder (совместный проект NOAA/NASA, направленный на получение высококачественных глобальных данных о ТПМ), в основном с 1985 г. Разрешение спутниковых данных по температуре — $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, по пространству и времени оно определяется используемым массивом данных. Например, работа (*Гинзбург* и др., 2004) основана на еженедельных данных MCSST с пространственным разрешением примерно 18 км, а работа (*Ginzburg et al.*, 2008a) — на среднемесячных данных проекта Pathfinder с пространственным разрешением 9 км. Во всех случаях использовались интерполированные данные, соответствующие ночному времени для исключения эффекта солнечного прогрева. Поскольку восстановление «истинных» значений температуры по измерениям AVHRR основано на сопоставлении спутниковых данных с натурными (главным образом, с измерениями дрейфтеров в поверхностном слое океана), данные массивов MCSST и Pathfinder соответствуют поверхностному слою моря и могут сравниваться с измерениями *in situ*.

Спутниковые данные дают представление о диапазоне изменчивости ТПМ в выбранных регионах моря в каждом месяце (сезоне, годе), сезонном цикле температуры, ее межгодовой изменчивости (с выявлением экстремальных значений), тренде в рассматриваемый период времени. Возможно также построение средних за определенный период полей ТПМ по выбранным акваториям (пример среднего за 1982–2000 гг. поля ТПМ для Каспия, построенного по данным MCSST, дан в статье (*Гинзбург* и др., 2004)).

Специальные эксперименты по валидации спутниковых измерений для внутренних южных морей не проводились, однако сопоставление полей ТПМ в Черном море, полученных на основе MCSST и по гидрологическим данным (*Ginzburg et al.*, 2004), а также сравнение осредненных в масштабе моря зимних значений (февраль-март) массива Pathfinder с аналогичными натурными измерениями (*Ginzburg et al.*, 2008) показало их хорошее соответствие (в последнем случае разность между спутниковыми и натурными данными в большинстве случаев не превышала $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Отличия существуют и между массивами спутниковых данных — MCSST и проекта Pathfinder с разным пространственным (4, 9, 18 км) и временным (неделя, месяц) разрешением: исходные и вычисленные на их основе среднемесячные или средне-сезонные/среднегодовые значения ТПМ Черного моря несколько отличаются (в большинстве случаев не более чем на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однако эти различия в значениях ТПМ, рассчитанных по разным массивам исходных спутниковых данных, не меняют вывода о характере выявленной долговременной изменчивости температуры бассейна.



Р и с . 7.9а. Схема Каспийского моря с выделенными регионами исследования:
1, 2 и 3 — Северный, Средний и Южный Каспий

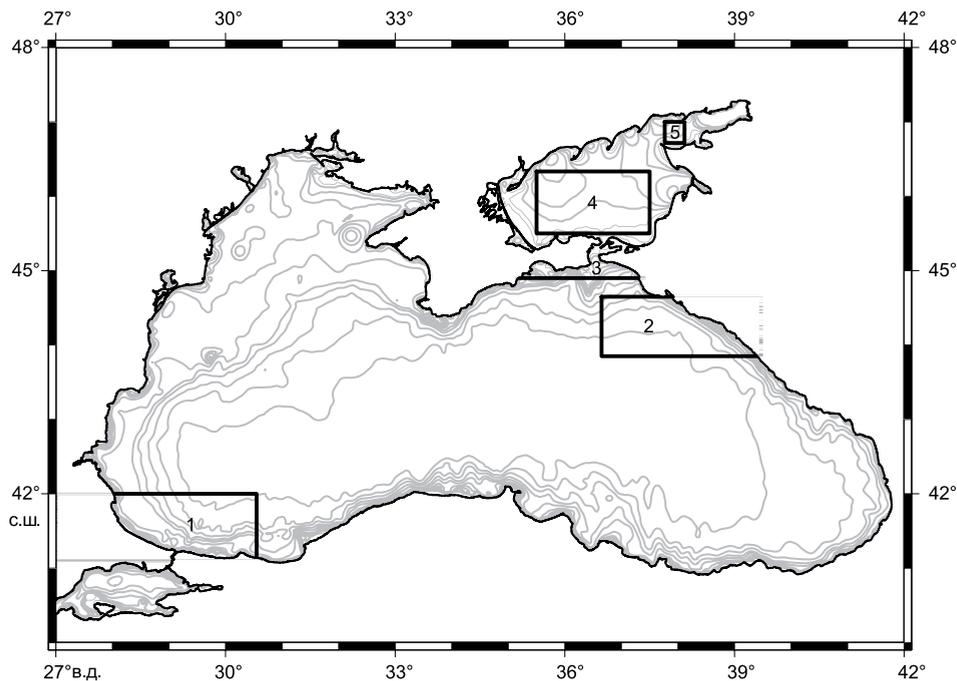


Рис. 7.9б. Схемы Черного и Азовского морей с выделенными регионами исследования: 1, 2 и 3 — прибосфорский, северо-восточный и прикерченский регионы Черного моря; 4 и 5 — центральная часть Азовского моря и Таганрогский залив

Ниже представлен анализ сезонной и межгодовой изменчивости ТПМ Каспийского, Азовского, Черного морей и их отдельных регионов на протяжении более четверти века (1982–2009) на основе главным образом спутниковых данных — массива еженедельных значений ТПМ проекта Pathfinder с пространственным разрешением 4 км (quality 5). В отличие от предыдущих массивов данных этого проекта с разным пространственным разрешением (4 и 9 км), содержащих информацию о ТПМ с 1985 г., в него включены также температурные данные 1982–1984 гг. как «предварительные».

В Каспийском море, с учетом физико-географических особенностей, характера подводного рельефа и заметной зависимости температуры от широты, анализ температурной изменчивости проводился для трех регионов (Северного, Среднего и Южного Каспия, рис. 7.9а, см. с. 380) с несколько отличающимся от традиционного (Гидрометеорология..., 1992) положением границ между Северным и Средним, Средним и Южным Каспием для удобства расчета ТПМ. В Черном море анализировались данные ТПМ как для моря в целом, так и для трех его регионов (прибосфорского, северо-восточного и прикерченского, в котором наблюдаются воды азовоморского происхождения, рис. 7.9б). В Азовском — для двух открытых регионов моря: центрального (с глубинами более 10 м) и западной части Таганрогского залива (с глубинами более 5 м) (см. рис. 7.9б). Значения ТПМ, полученные по данным массива Pathfinder для залива Кара-Богаз-Гол, в отличие от рассчитанных по MCSST-данным

(1982–2000) (*Гинзбург* и др., 2004; *Ginzburg et al.*, 2005), не соответствуют известным из литературы и характерным для этого региона (*Гинзбург* и др., 2004). Они практически совпадают со значениями для Среднего Каспия, что, по-видимому, стало следствием выбранного разработчиками проекта Pathfinder алгоритма обработки глобальных AVHRR-данных, не учитывающего обособленность этого малого региона. Поэтому изменчивость температуры в заливе Кара-Богаз-Гол Каспийского моря в данном исследовании не рассматривается.

7.4.2. Каспийское море

Из-за образования сезонного ледяного покрова в мелководном Северном Каспии (Гидрометеорология..., 1992) исследование изменчивости его термического режима на основе спутниковых ИК-данных ограничено теплым временем года (апрель–октябрь). Сезонные циклы разных регионов Каспийского моря, построенные по спутниковым данным, соответствуют известным натурным наблюдениям (Гидрометеорология..., 1992) (см. *Гинзбург* и др., 2004; *Ginzburg et al.*, 2005). Летние максимумы ТПМ (недельные значения) в Северном Каспии наступают преимущественно в июле, в Среднем — в июле–августе, в Южном Каспии — в августе. Зимние минимумы достигаются в Среднем и Южном Каспии в феврале и марте (в Среднем Каспии — чаще в феврале, в Южном Каспии — в марте), в Северном Каспии — в январе–феврале (Гидрометеорология..., 1992).

На рис. 7.10 (см. с. 383, 384) показаны среднесезонные значения ТПМ в регионах Каспия для четырех гидрологических сезонов (зима: январь–март, весна: апрель–июнь, лето: июль–сентябрь, осень: октябрь–декабрь). Очевидна одинаковая тенденция (в среднем) многолетней изменчивости среднесезонной температуры в трех регионах Каспийского моря. Во все сезоны температура Среднего Каспия ниже, чем Южного. Весной и во время максимального прогрева ТПМ мелководного Северного Каспия выше, чем Среднего, а в летний сезон в среднем, когда сказывается охлаждение Северного Каспия в сентябре, они близки. Самые низкие зимние значения температуры в период 1982–2009 гг. в Среднем Каспии наблюдались в 1985 и 1987–1988 гг., в Южном — в 1985 и 1992–1994 гг., самые высокие в Среднем Каспии — в 1995 и 2004 гг., в Южном — в 1999 и 2004 гг. Заметим, что максимум зимних значений в 1995 г. в Среднем Каспии на рис. 7.10 вызывает сомнение, поскольку его не было в соответствующих значениях ТПМ, оцененных по MCSST-данным (*Гинзбург* и др., 2004; *Ginzburg et al.*, 2005), и минимальная температура воздуха над Средним Каспием, в соответствии с данными NASA (Giovanni online data system, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), в 1995 г. не столь разительно отличалась от зарегистрированных в 1994 и 1996 гг. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Наиболее высокие летние ТПМ в всех трех регионах Каспия зарегистрированы в основном в 1998–2000 и 2005–2008 гг. Сезонные температурные тренды в Среднем Каспии зимой, весной, летом и осенью, оцененные методом линейной регрессии недельных значений ТПМ, составили 0,05; 0,06; 0,07 и 0,08 °С/год соответственно, в Южном Каспии за тот же период — 0,04; 0,04; 0,06 и 0,05 °С/год. Таким образом, наиболее высокие скорости увеличения температуры в рассматриваемый период наблюдались в летний и осенний сезоны.

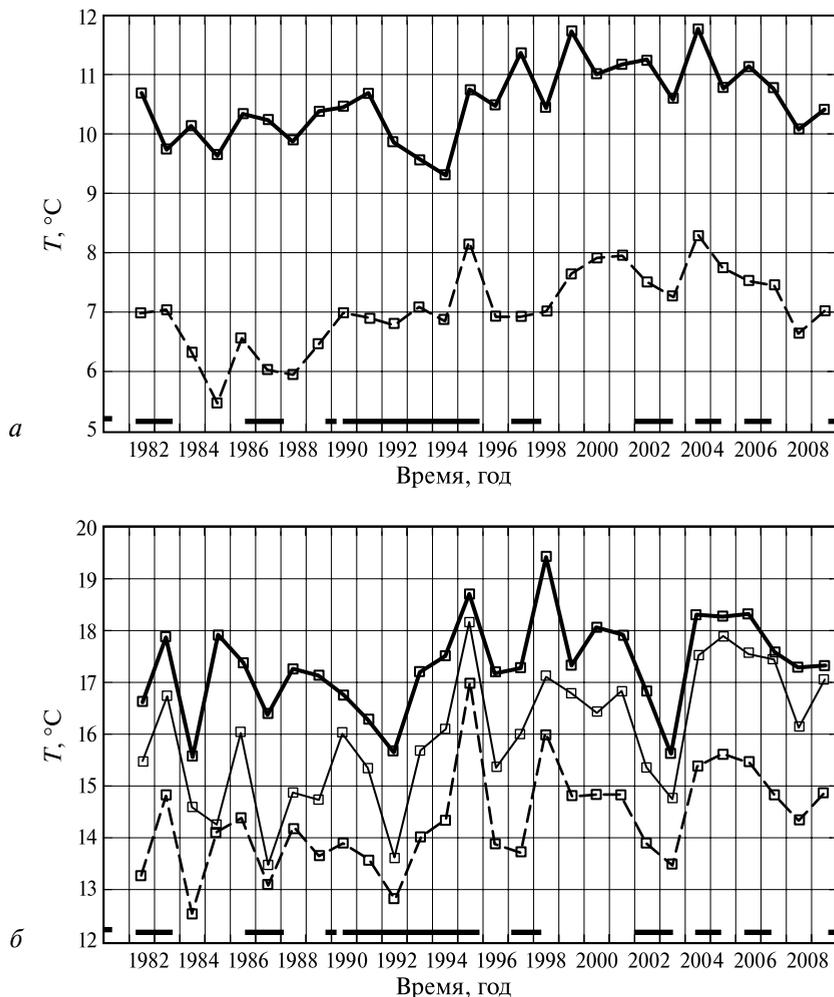


Рис. 7.10а, б. Среднесезонные значения средней ТПМ для трех регионов Каспия в период 1982–2009 гг.: зима (а), весна (б). Сплошная толстая линия относится к Южному Каспию, пунктир — к Среднему, сплошная тонкая линия — к Северному Каспию. Здесь и далее толстые черные горизонтальные сегменты отмечают периоды Эль-Ниньо

Следует отметить, что и в пределах выделенных акваторий Каспия, при одинаковой в среднем тенденции многолетней изменчивости, возможны различия в температурных режимах разных лет под влиянием региональных факторов. Так, в одну из самых суровых зим в Туркменистане — в зиму 2007/2008 г. — замерз Красноводский залив Каспия (см. сайт <http://nature-tm.narod2.ru/turkmenistan/klimat>). Сводка аномальных летних и зимних температур в регионах Каспийского моря в 1939–2000 гг., составленная по опубликованным данным, дана в работе (Гинзбург и др., 2004). Одними из самых суровых в этот период в Каспии были зимы 1953/1954 г., когда плавающие льды достигали Апшеронского полуострова (см. сайт <http://meteoweb.ru/2009/ar060.php>), и 1968/1969 г.; одной из самых теплых была зима 1965/1966 г.

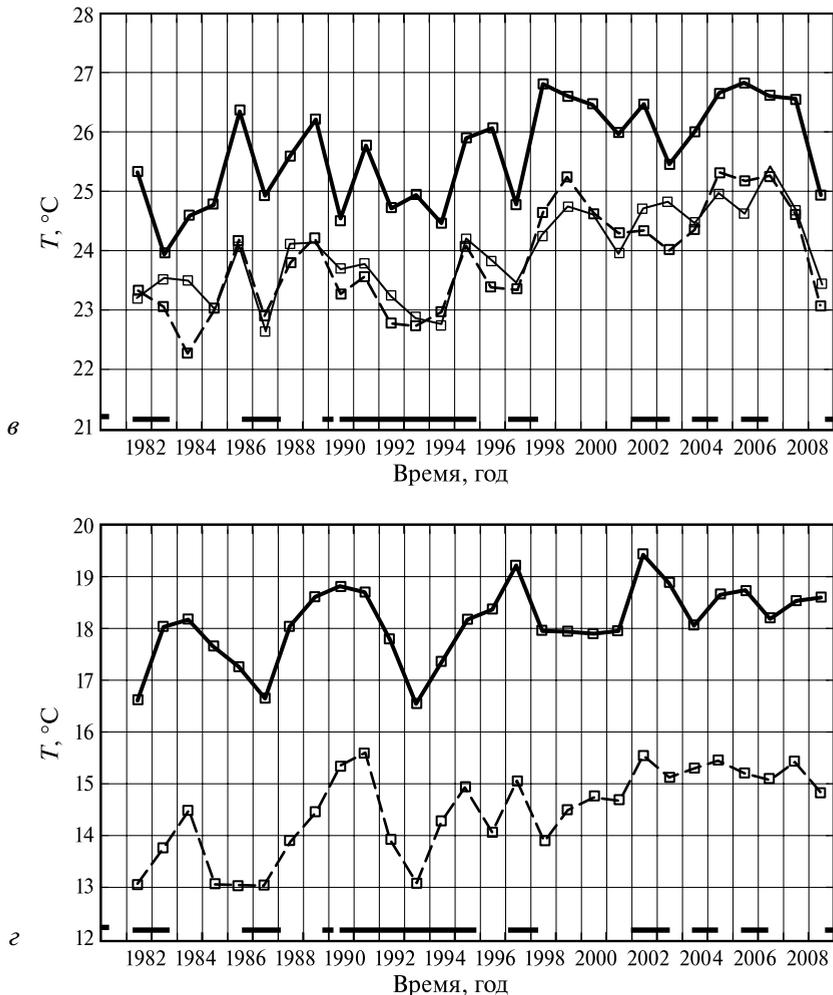


Рис. 7.10а, б. Среднесезонные значения средней ТПМ для трех регионов Каспия в период 1982–2009 гг.: лето (а) и осень (б). Сплошная толстая линия относится к Южному Каспию, пунктир — к Среднему, сплошная тонкая линия — к Северному Каспию. Здесь и далее толстые черные горизонтальные сегменты отмечают периоды Эль-Ниньо

Годовой размах температуры (разность между максимальными летними и минимальными зимними недельными значениями) менялся в рассматриваемый период 1982–2009 гг. в Среднем и Южном Каспии в диапазонах 18,9–22,6 °С и 16,3–20,3 °С соответственно. Средняя годовая температура для Среднего Каспия оказалась равной 14,7 °С, Южного — 17,8 °С. Характер долговременной изменчивости среднегодовой температуры в этих регионах, которая практически не зависит от положения уровня моря (*Потайчук*, 1978), в общем одинаков (рис. 7.11, см. с. 385) (вопрос максимума этой температуры в 1995 г. в Среднем Каспии, как и средnezимней, требует дальнейшего рассмотрения). Как и у среднесезонных ТПМ, он не был монотонным.

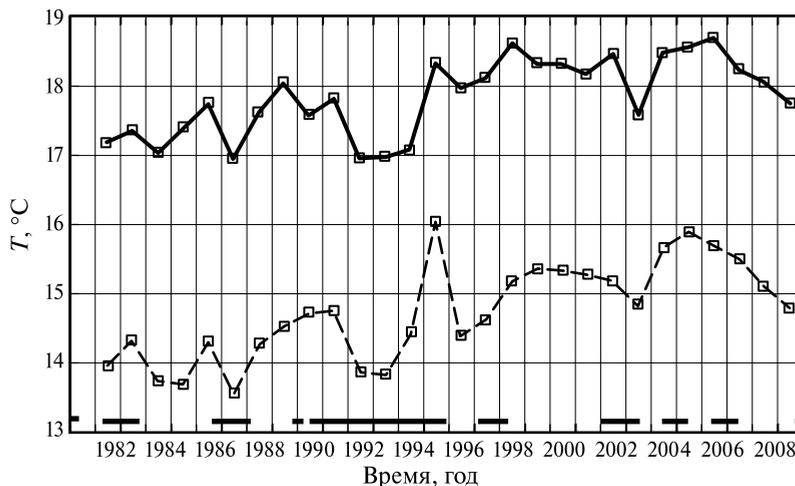


Рис. 7.11. Среднегодовые значения средней ТПМ для Среднего и Южного Каспия в 1982–2009 гг. Обозначения — как на рис. 7.10

После заметного понижения среднегодовой температуры в 1991–1994 гг. наблюдался ее рост (в среднем) до 2006 г.; в дальнейшем она, как и летняя ТПМ (см. рис. 7.10в), понижалась. Заметим, что экстремальные значения среднегодовых и сезонных значений ТПМ часто соответствуют периодам Эль-Ниньо.

Тренды среднегодовой ТПМ в период 1982–2009 гг., оцененные по недельным значениям температуры методом линейной регрессии, были равны 0,06 и 0,05 °C/год в Среднем и Южном Каспии соответственно. Для сравнения: известные оценки дают для Северного Каспия тренд ТПМ в 1960–1983 гг., равный 0,01 °C/год, и примерно такой же — для Баку в 1900–1970 гг. (Гинзбург и др., 2004). Таким образом, положительный тренд ТПМ в Каспии в последнюю четверть века в несколько раз превысил таковой в предшествующий период.

7.4.3. Азовское море

В Азовском море, покрытом в декабре-марте полностью или частично льдом (Гидрометеорология..., 1991б), использование спутниковых данных ограничивается навигационным периодом с апреля по ноябрь. При наличии пробелов в апрельских и ноябрьских исходных данных для Азовского моря, особенно для Таганрогского залива (в отдельные годы отсутствовали значения температуры для одной-трех недель), отсутствующие значения ТПМ искусственно восстанавливались линейной интерполяцией при известных тенденциях изменения температуры в конкретном сезоне.

Отсутствие (в большинстве случаев) полного ряда недельных зимних температур для Азовского моря не позволяет рассчитать среднегодовые значения для всего периода 1982–2009 гг. Для 2004 г. с мягкой зимой и относительно полным набором исходных недельных ТПМ такой расчет для центрального региона дал 13,1 °C, при

максимальном значении в последнюю неделю июля $26,7^{\circ}\text{C}$ и минимальном в феврале $2,2^{\circ}\text{C}$. Среднезимняя за вековой период температура в Таганрогском заливе и в центре Азовского моря может меняться, в зависимости от солёности, от $-0,1$ до $+0,2^{\circ}\text{C}$ и от $-0,3...-0,7$ до $+0,2...+0,4^{\circ}\text{C}$ соответственно, а в относительно теплые зимы, как, например, 1980/1981 гг., — от $+2,5$ до $+6^{\circ}\text{C}$ и от $+3$ до $+7^{\circ}\text{C}$ соответственно (Матишов и др., 2008б).

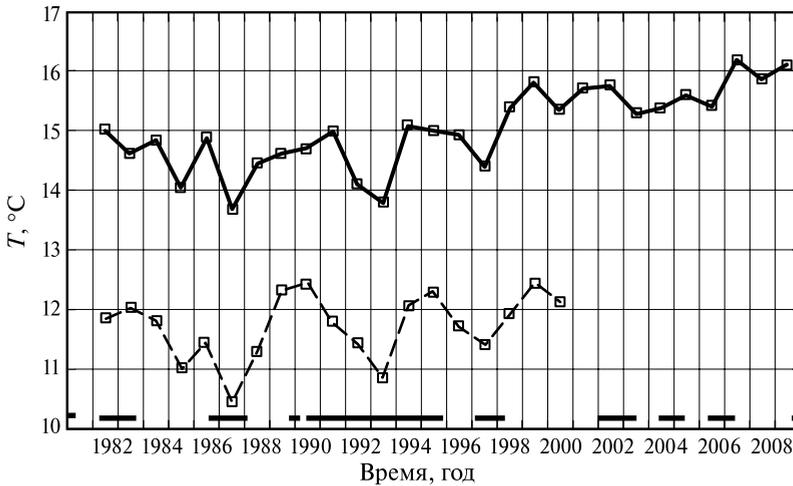


Рис. 7.12. Среднегодовые значения ТПМ в Черном море в целом (по спутниковым данным 1982–2009 гг. — сплошная линия) и в Азовском море в 1982–2000 гг. (по данным (Дашкевич, 2008) — пунктир)

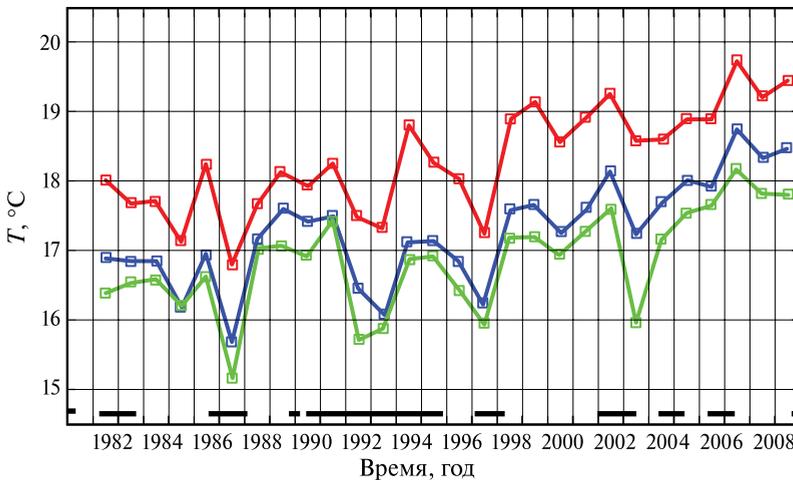


Рис. 7.13. Средние за апрель–ноябрь значения ТПМ в Черном море в целом (красный цвет), в центральном регионе Азовского моря (синий) и в Таганрогском заливе (зеленый) в 1982–2009 гг.

По данным береговых гидрометеорологических станций (Matishov et al., 2006; Дашкевич, 2008), минимальные значения среднегодовой ТПМ в Азовском море в 1982–2000 гг. наблюдались в 1985, 1987, 1992–1993 и 1997 гг., максимальные — в 1990 и 1999 гг. (рис. 7.12, см. с. 386). Диапазон изменчивости среднегодовых значений температуры в этот период был равен примерно 2°C .

Оцененный по спутниковым данным тренд средней за навигационный период (апрель–ноябрь) ТПМ в 1982–2009 гг. (рис. 7.13, см. с. 386) составил примерно $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в центральной части Азовского моря и $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в Таганрогском заливе. При этом средняя за теплый период температура превышала среднегодовую примерно на 5°C (см. рис. 7.12, 7.13). Температура воды в Таганрогском заливе была ниже, чем в центральной части Азовского моря (см. рис. 7.13).

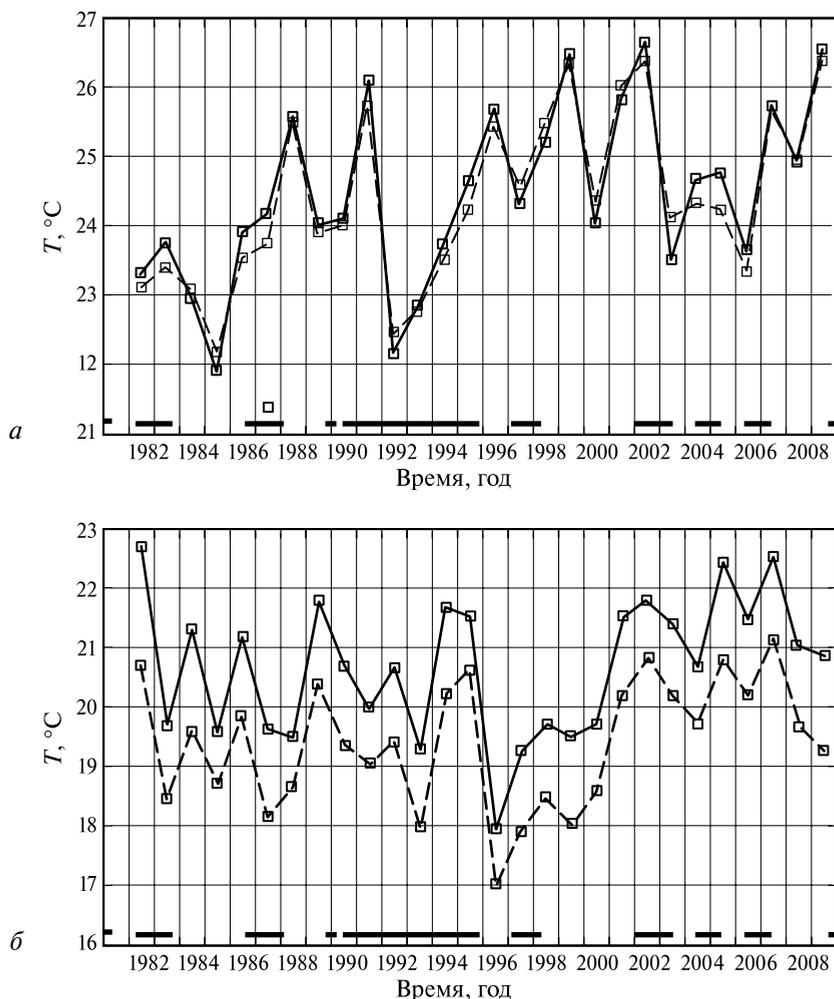


Рис. 7.14. Средние за июль (а) и сентябрь (б) значения ТПМ в центральном регионе Азовского моря (сплошная линия) и в Таганрогском заливе (пунктир) в 1982–2009 гг.

В отличие от 1945–1986 гг. с отрицательными трендами температуры в июле–сентябре (по данным береговых гидрометеорологических станций (Гидрометеорология..., 1991б), см. также (Гаргона, 2001)), в 1982–2009 гг. тренд ТПМ в обоих открытых регионах Азовского моря в эти месяцы (и в другие месяцы навигационного периода) был в среднем положительным, с заметным ростом ТПМ примерно с середины 1990-х гг. (рис. 7.14, см. с. 387).

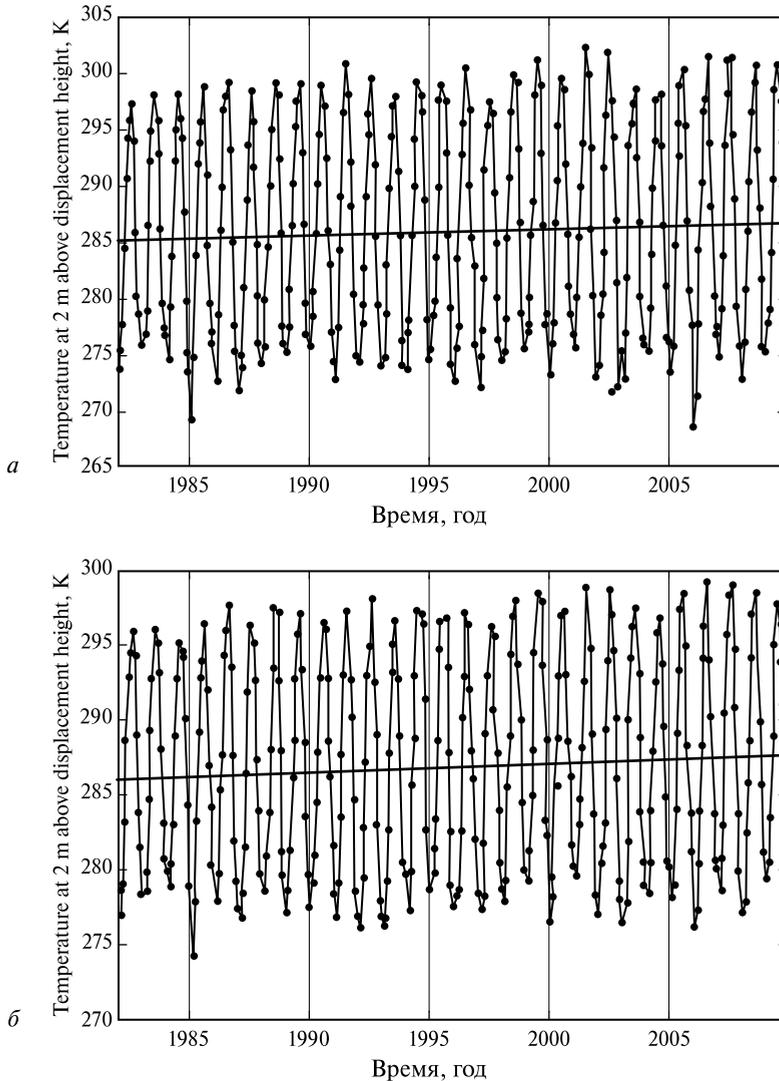


Рис. 7.15. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры воздуха над Азовским (45–47° с. ш., 35–38° в. д.) (а) и Черным (41–45° с. ш., 29–40° в. д.) (б) морями в 1982–2009 гг. (NASA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, Giovanni, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>)

Об экстремальных зимних условиях в Азовском море, в отсутствие спутниковых данных, можно судить по опубликованным работам (Дашкевич, 2008; Комплексные..., 2010; Матишов и др., 2008б, в). По данным (Комплексные..., 2010), самыми холодными в 2000-е гг. в Азовском море были (в порядке уменьшения суровости) зимы 2005/2006, 2002/2003 и 2007/2008 гг. Согласно работам (Матишов и др., 2008а, б), зима 2005/2006 г. была одной из самых холодных за последние 50 лет на южных морях; толщина льдов в Азовском море достигала 0,5 м, а высота торосов — 1,5–2,5 м. В соответствии с архивными данными (<http://meteoweb.ru/2009/ar060.php>) и работой (Матишов и др., 2008б), аномально холодной была зима 1953/1954 гг., когда Азовское море полностью замерзло, а через Керченский пролив открылось устойчивое автомобильное сообщение. Временные ряды температуры воздуха на побережье в Азовском море (Гаргона, 2001; Матишов и др., 2008а) также свидетельствуют об аномально холодной зиме 1953/1954 г. В соответствии с теми же данными, аномально теплой была зима 1965/1966 г.

Мягкими в 2000-е гг. в Азовском море, по данным (Комплексные..., 2010), были зимы 2003/2004 и 2004/2005 гг. (зима 2008/2009 г. упоминается как нормальная). В работах (Дашкевич, 2008; Матишов и др., 2008в) отмечается, что теплой была зима 2006/2007 гг. Эти экстремумы зимней ТПМ подтверждаются характером межгодовой изменчивости температуры воздуха (ТПВ) над Азовским морем (ТПМ и ТПВ имеют высокую взаимную корреляцию (Гаргона, 2001; Пиотух и др., 2009)). По данным NASA (Giovanni online data system, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), зимние минимумы среднемесячной ТПВ над Азовским морем наблюдались в 2006, 2003 и 2008 гг., наиболее высокие зимние температуры воздуха — в 2001, 2004 и 2007 и 2009 гг. В соответствии с рис. 7.15а (см. с. 388), зима 2000/2001 г. в Азовском море была одной из самых теплых в 2000-е гг. Те же данные Giovanni online data system

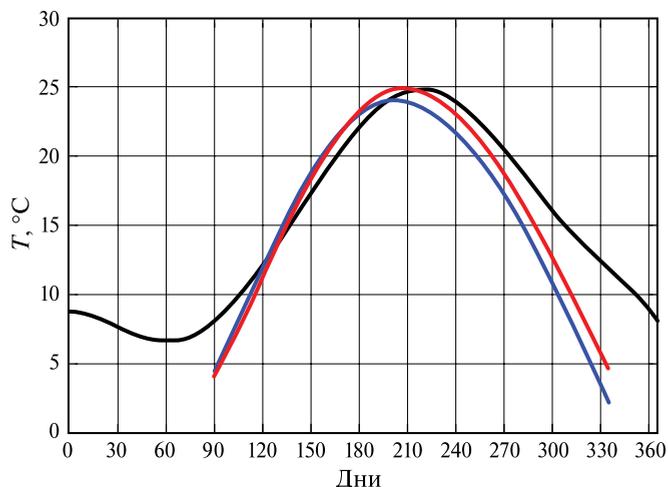


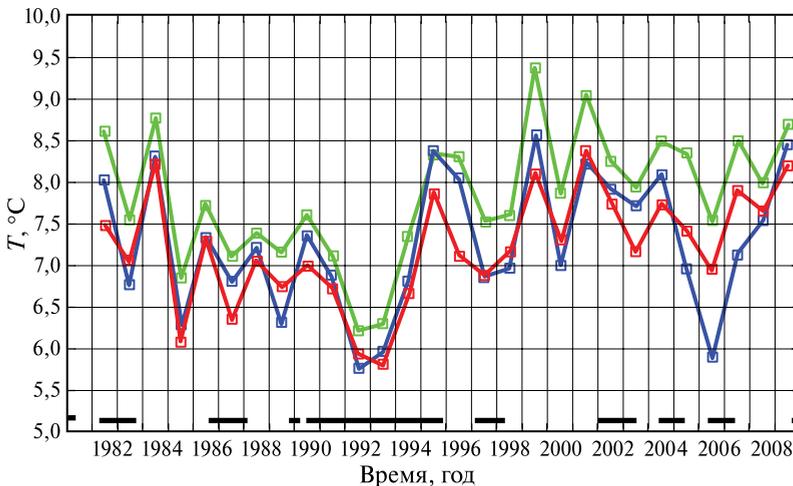
Рис. 7.16. Сезонные циклы ТПМ Черного моря в целом (черная линия), центрального региона Азовского моря (красная) и Таганрогского залива (синяя), построенные путем аппроксимации еженедельных спутниковых данных 1982–2009 гг. полиномами седьмой степени (для регионов Азовского моря расчет — период апрель–ноябрь)

позволяют предполагать, что в интервале 1980–2009 гг. одной из самых теплых в Азовском и Черном морях была зима 1980/1981 г., что подтверждается для Черного моря работой (*Belokopytov*, 1998).

На рис. 7.16 (см. с. 389) показаны различия в сезонных циклах рассматриваемых регионов Азовского моря. Максимум температуры в центральной части Азовского моря наблюдается в среднем в конце июля — начале августа, в Таганрогском заливе — во второй половине июля. В центральной части Азовского моря в период весеннего прогрева (осеннего выхолаживания) ТПМ ниже (выше), чем в Таганрогском заливе, а максимальная летняя температура выше (см. рис. 7.16). Осенний спад ТПМ (сентябрь–ноябрь) в центральной части Азовского моря происходит позже, чем в Таганрогском заливе, примерно на полмесяца. Температурный минимум наблюдается в феврале (Гидрометеорология..., 1991б). Годовой размах температуры в Азовском море из-за низких зимних значений может превышать 20 °С. Например, годовой размах недельных значений ТПМ в 2004 г. в центральной части Азовского моря составил 24,5 °С.

7.4.4. Черное море

Рисунки 7.12 и 7.17 дают представление о характере изменения среднегодовой и зимней температуры Черного моря в рассматриваемый период. Очевидно дальнейшее, по сравнению с периодом до 2006 г. (*Гинзбург* и др., 2009), потепление Черного моря. Среднегодовая температура воды в море в целом, не превышавшая в 1982–1993 гг. 15 °С, в 2007–2009 гг. увеличилась до ~16 °С. Положительный тренд среднегодовой ТПМ в Черном море в целом за весь рассматриваемый период, полученный методом линейной регрессии, оказался равным примерно 0,06 °С/год, а в его прибосфорском, северо-восточном и прикерченском регионах, при схожем в общих чертах характере



Р и с . 7.17. Средние за февраль-март значения ТПМ в Черном море в целом (красный цвет), в его северо-восточном (зеленый) и прикерченском (синий) регионах

межгодовой изменчивости — примерно 0,05; 0,06 и 0,08 °С/год соответственно. Причем потепление имело место во все сезоны. Диапазон изменения среднегодовой ТПМ в этот период в море в целом составил примерно 2,5 °С (см. рис. 7.12). Годами с наименьшей среднегодовой ТПМ для моря в целом были 1985, 1987, 1992 и 1993 гг., с наибольшей — 2007–2009 гг.

Тренд ТПМ в теплый период (апрель–ноябрь, см. рис. 7.13) в 1982–2009 гг. составил ~0,07 °С/год в Черном море в целом и 0,06–0,08 °С/год в его регионах. При этом средняя для данного периода температура в море превышала среднегодовую примерно на 3–3,5 °С.

Сезонный цикл ТПМ показан на рис. 7.16. Максимум ТПМ приходится на первую декаду августа, минимум наблюдается в феврале–марте. Годовой размах температуры в Черном море меньше, чем в Азовском из-за более высоких зимних температур при близких летних. Например, годовой размах недельных значений ТПМ в 2004 г. составил в Черном море в целом и в его прикерченском регионе 18,1 и 19,0 °С соответственно при 24,5 °С в центральной части Азовского моря.

На рис. 7.17 показано, что характер межгодовой изменчивости средней за февраль–март (самые холодные месяцы года) ТПМ в Черном море в целом и в двух его северных регионах в общих чертах одинаков (такой же в общем и характер зимней ТПМ в прибосфорском регионе). Зимняя температура северо-восточного региона выше, чем моря в целом, примерно на 0,5 °С, что связано с приходом в этот регион более теплых вод с юго-востока с Основным черноморским течением. Тренд зимней температуры (февраль–март) в море в целом в 1982–2009 гг. составил примерно 0,04 °С/год. Самыми теплыми в 2000-х гг. были зимы 2000/2001 и 2008/2009 гг.; наиболее низкие зимние значения ТПМ в Черном море в целом наблюдались в 2006 и 2003 гг., в его северо-восточном регионе — в 2006, 2003 и 2008 гг.; в прикерченском регионе, где сказывается влияние азовоморских вод, самые низкие температуры зарегистрированы в 2006 г. (см. рис. 7.17), хотя из-за пропусков в недельных значениях в 2006 г. в этом регионе указанное на рисунке значение может отличаться от истинного. (По данным работы (Матушов и др., 2008б), среднезимняя за вековой период температура воды в Керченском проливе меняется от –0,5...0 до +0,5...+1,5 °С, а в относительно теплые зимы — в диапазоне +4...+9 °С.) Наблюдавшиеся экстремумы зимней ТПМ хорошо согласуются с временным рядом ТПВ за тот же период (см. рис. 7.15б).

Одной из самых холодных зим в Черном море была, в соответствии с временными рядами температуры холодного промежуточного слоя (ХПС) (Belokopytov, 1998; Ginzburg et al., 2008a; Белокопытов, 2010), как и в Азовском и Каспийском морях, зима 1953/1954 г. Заметим, что значения температуры ХПС в Черном море — один из показателей суровости зимы — в 1987 и 1954 гг. были практически одинаковыми и самыми низкими в 1954–2008 гг. (Белокопытов, 2010). На их фоне зима 2006 г. в Черном море в этот период не была аномально холодной, тогда как в мелководном Азовском море она по суровости была схожа с зимой 1954 г. (Матушов и др., 2008a).

7.5. ВЫВОДЫ

Анализ пространственно-временной изменчивости скорости роста или понижения уровня южных морей показал, что в Каспийском море на ее неоднозначность влияет

не только сток реки Волги, но и особенности гравитационного поля, а в Черном море — сток рек, интенсивность антициклонической циркуляции, в меньшей степени — водообмен через проливы.

Сравнительный анализ межгодовой изменчивости температуры поверхности (поверхностного слоя) Каспийского, Черного и Азовского морей и их регионов, выполненный на основе спутниковых данных с высоким пространственным (4 км) и временным (1 неделя) разрешением, показал схожий (в основных чертах до 2006. г.) характер этой изменчивости в южных морях (см. рис. 7.11, 7.12). Это позволяет предполагать определяющую роль климата в межгодовой изменчивости ТПМ и ее тренде на фоне возможных различий в региональных атмосферных воздействиях. Имевшее место потепление южных морей (в среднем) в 1982–2009 гг. согласуется с наблюдающимся с конца 1970-х гг. глобальным потеплением (*Levitus et al.*, 2000; *Hansen et al.*, 2010). Возможно также, что аномально низкие сезонные и среднегодовые значения ТПМ в 1992–1993 гг. стали следствием влияния образовавшихся аэрозолей в результате самого мощного в XX веке извержения филиппинского вулкана Пинатубо в июне 1991 г. Его последствия ощущались в атмосфере Северного полушария до 1995 г. (*Ginzburg et al.*, 2008a).

Заметим, однако, что выявленные тенденции изменения температуры и полученные оценки трендов среднегодовой и среднесезонных ТПМ в южных морях относятся только к рассматриваемому периоду 1982–2009 гг. На более длительном временном интервале подобные оценки могут быть другими, что наглядно демонстрируют временные ряды среднегодовых ТПМ в Азовском море с конца 1920-х до 2000 г. (*Matishov et al.*, 2006; *Дашкевич*, 2008) и временной ряд зимних ТПМ в Черном море с 1957 г. (*Ginzburg et al.*, 2008a; *Гинзбург* и др., 2009).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №: 07-05-00141-а, 09-05-91221-СТ_а, 09-01-12029-офи_м, 10-05-00097-а, 11-07-12025-офи-м-2011) и проектов INTAS ALTICORE и MOPED.

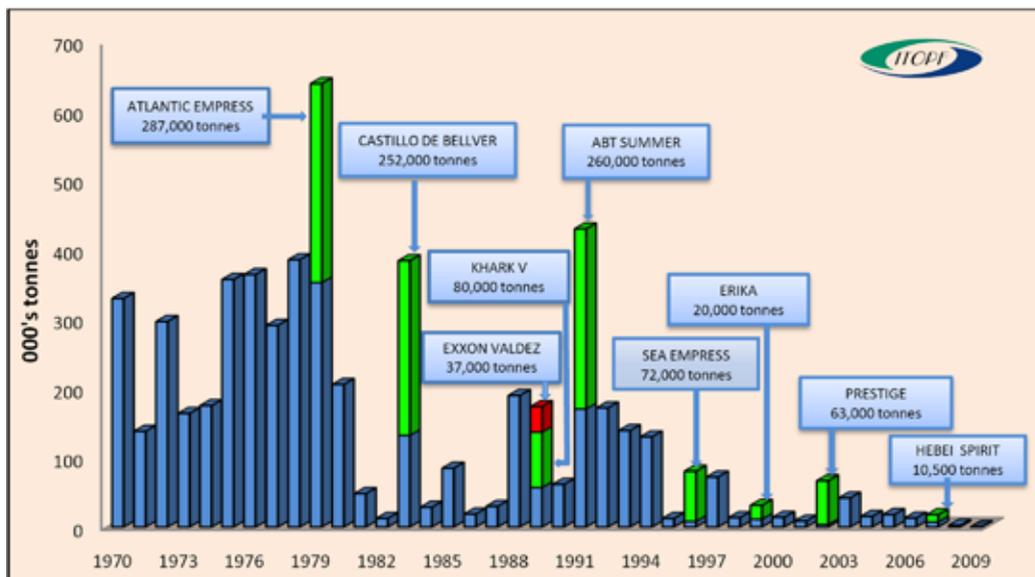
Глава 8

МОНИТОРИНГ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

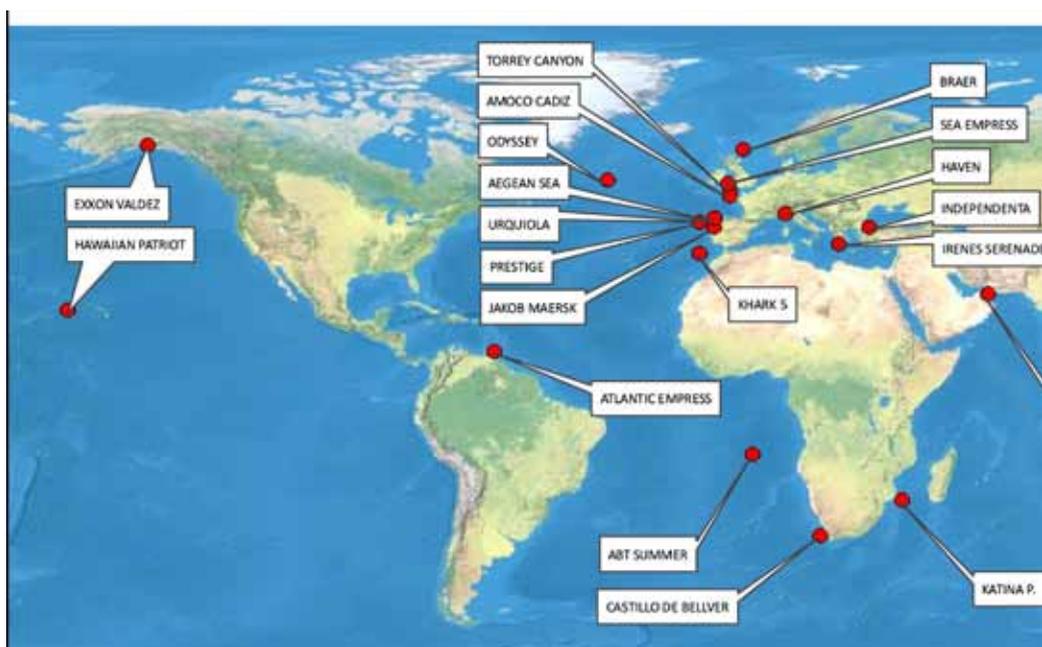
ВВЕДЕНИЕ

Катастрофические разливы нефти, связанные в первую очередь с авариями на морских нефтяных платформах или с крушением танкеров, к счастью, происходят редко, но они приводят к серьезным экологическим катастрофам. По данным международной организации “The International Tanker Owners Pollution Federation Limited” (ИТОПФ), разливы 700 и более тонн нефти и нефтепродуктов происходят в результате пробоя корпуса, пожаров, посадки на мель и столкновений танкеров. Примерно 5,65 млн т нефти попало в море в результате аварий танкеров в период с 1970 по 2009 г. (<http://www.itopf.com/information-services/data-and-statistics/statistics/>). Однако таких чрезвычайных ситуаций становится с каждым годом все меньше и меньше. На диаграмме, составленной ИТОПФ (рис. 8.1, см. с. 394) видно, что большая часть аварий приходилась на 1970-е гг. прошлого столетия, их доля в общем количестве крупных разливов нефти (более 7 т) составила 53 %. В последние годы, в связи с вводом в эксплуатацию современных и более надежных танкеров, количество аварий резко сократилось. В табл. 8.1 (см. с. 395) представлены характеристики самых крупных катастроф, связанных с крушениями танкеров, а на рис. 8.2 (см. с. 394) изображена карта, на которой отмечены районы, где эти крушения произошли. Видно, что практически все катастрофические разливы нефти случились в непосредственной близости от берега, что неминуемо вело к серьезному загрязнению береговой черты. Ущерб от этих катастроф мог быть еще большим, если бы не удалось отслеживать перенос пятен нефтяных загрязнений в море и прогнозировать место и время их выброса на побережье. Наиболее эффективным средством отслеживания распространения нефтяного загрязнения является спутниковый мониторинг, в первую очередь с помощью радиолокаторов спутникового базирования.

Катастрофы нефтяных танкеров, помещенные в этой таблице, произошли в результате столкновений, пожаров, взрывов или посадки на мель. Однако самые грандиозные разливы нефти на море случались во время военных действий. Так, с января по июнь 1942 г. у восточного берега США в результате активных действий германских подлодок против танкеров было разлито около 600 000 т нефти. Во время войны в Персидском заливе в июне 1991 г. на поверхность моря вылилось не менее 1 000 000 т нефти.



Р и с . 8.1. Крупнейшие катастрофические разливы нефтепродуктов (>7 т), связанные с авариями судов (© ИТОПФ)



Р и с . 8.2. Районы катастроф нефтяных танкеров, перечисленных в табл. 8.1 (© ИТОПФ)

Таблица 8.1. Крупнейшие катастрофы нефтяных танкеров, происшедшие в результате столкновений, пожаров, взрывов или посадки на мель

Позиция	Название судна	Год	Район катастрофы	Количество разлившейся нефти (тыс. т)
1	ATLANTIC EMPRESS	1979	У берегов Тобаго в Карибском море	287
2	ABT SUMMER	1991	В 700 морских милях от берегов Анголы в Атлантическом океане	260
3	CASTILLO DE BELLVER	1983	в 70 милях от Кейптауна (ЮАР)	252
4	AMOCO CADIZ	1978	У берегов Бретани (Франция) в проливе Ла-Манш	223
5	HAVEN	1991	У берегов Генуи (Италия)	144
6	ODYSSEY	1988	В 700 морских милях от берегов Новой Шотландии (Канада) в Северной Атлантике	132
7	TORREY CANYON	1967	Острова Сцилли (Великобритания)	119
8	SEA STAR	1972	Оманский залив	115
9	IRENES SERENADE	1980	Залив Наварино (Греция)	100
10	URQUIOLA	1976	У порта Ла Корунья (Испания)	100
11	HAWAIIAN PATRIOT	1977	В 300 морских милях от Гонолулу, Гавайские о-ва	95
12	INDEPENDENTA	1979	В проливе Босфор (Турция)	95
13	JAKOB MAERSK	1975	Опорто (Португалия)	88
14	BRAER	1993	Шетландские острова (Великобритания)	85
15	KHARK 5	1989	В 120 морских милях от атлантического побережья Марокко	80
16	AEGEAN SEA	1992	У порта Ла Корунья (Испания)	74
17	SEA EMPRESS	1996	Милфорд Хэйвен (Великобритания)	72
18	NOVA	1985	У берегов острова Харк (Иран) в Персидском заливе	70
19	KATINA P.	1992	Вблизи Мапуту (Мозамбик)	66,7
20	PRESTIGE	2002	У берегов Галисии (Испания)	63
35	EXXON VALDEZ	1989	Залив Принца Уильяма (Аляска, США)	37

По инициативе канадского космического агентства (CSA) 20 октября 2000 г. европейское и французское космические агентства подписали хартию «Космос и крупные бедствия» (The International Charter “Space and Major Disasters”) с целью

обеспечения широкого доступа к космической мониторинговой информации в ходе осуществления мероприятий по ликвидации последствий всех возможных природных и техногенных катастроф. В табл. 8.2 представлены участники Хартии и ресурсы, которые они могут предоставить для осуществления экстренного космического мониторинга. Россия, на момент обновления информации на официальном сайте Хартии (28 мая 2010 г.), в список участников не входила. Последствия того, что Россия не является участником Хартии, сказались во время катастрофы в Керченском проливе в ноябре 2007 г.: целенаправленная радиолокационная съемка загрязненной акватории не проводилась, отдельные изображения были получены только на пятый день после аварии, а оптическая съемка в условиях облачности была малоинформативна.

Таблица 8.2

Члены Хартии	Космические ресурсы
European Space Agency (ESA)	ERS, Envisat
Centre national d'études spatiales (CNES)	
Spotimage	SPOT
NSPO	NSPO
Canadian Space Agency (CSA)	RADARSAT
Indian Space Research Organisation (ISRO)	IRS
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	POES, GOES
Argentina's Comisiyn Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)	SAC-C
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	ALOS
United States Geological Survey (USGS)	Landsat
Digital Globe	Quickbird
GeoEye	GeoEye-1
DMC International Imaging (DMC)	
Centre National des Techniques Spatiales (Algeria)	ALSAT-1
National Space Research and Development (Nigeria)	NigeriaSat
Tübitak-BILTEN (Turkey)	BILSAT-1
BNSC/Surrey Satellite Technology Limited (UK)	UK-DMC
BNSC/Qinetiq (UK)	TopSat
China National Space Administration (CNSA)	FY, SJ, ZY satellite series

8.1. КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ РАЗЛИВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ 11 НОЯБРЯ 2007 г.

Керченский пролив, соединяющий Черное и Азовское моря, является уникальным природным комплексом. Здесь находится место нереста, нагула и миграции многих ценных видов рыб, в том числе охраняемых и находящихся под угрозой уничтожения; орнитологический заказник, гнездятся водоплавающие птицы. По обоим берегам пролива расположены курортные зоны, которые привлекают туристов не только

песчаными пляжами, но и интереснейшими историческими и природными достопримечательностями.

В то же время Керченский пролив — крупнейшая транспортная артерия. Ежегодно по нему проходит более 10 тысяч торговых судов. На украинском побережье пролива действуют несколько крупных портовых комплексов, а с российской стороны — быстро развивающийся порт Кавказ. Мелководность пролива не дает возможности использовать плавсредства с большой осадкой, поэтому в основном по проливу проводятся суда типа «река-море». На якорной стоянке вблизи черноморского устья грузы переваливаются на крупнотоннажные океанские суда. В открытом море на рейде проходит перекачка нефти и перевалка сыпучих грузов (серы, соды, фосфора, угля, зерна) с одного корабля на другой. Причем перевалка часто осуществляется на судно-накопитель одновременно с двух речных судов на оба борта, хотя это запрещено правилами судоходства. Перекачка нефтепродуктов в море также запрещена — она должна производиться только в портах России или Украины, где имеется специальное оборудование и существует служба обеспечения безопасности. Подобные действия нередко приводят к загрязнению водного и воздушного бассейнов (рис. 8.3).

Кроме того, судоходство в проливе часто сопровождается несанкционированными сбросами грязных балластных вод, содержащих в первую очередь нефтепродукты. На спутниковых радиолокационных изображениях Керченского пролива регулярно наблюдаются темные пятна пониженного рассеяния, связанные с наличием антропогенных пленочных загрязнений морской поверхности (рис. 8.4, с. 398).

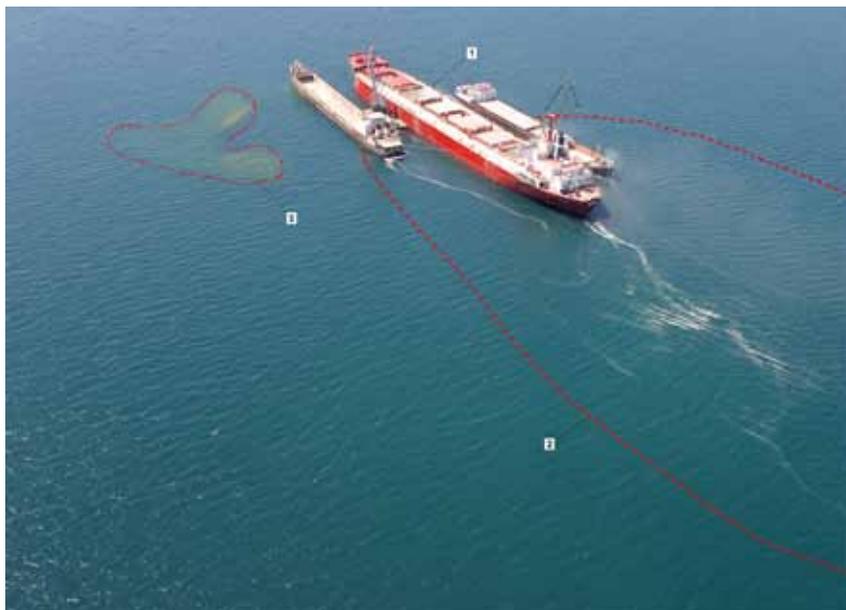


Рис. 8.3. Перевалка минеральных удобрений в районе м. Панагия: 1 — источник — суда на рейде; 2 — зона загрязнения; 3 — скопление водорослей. Снимок выполнен оптической камерой с вертолета 16.08.2003 г. © СЦ ГМС ЧАМ)

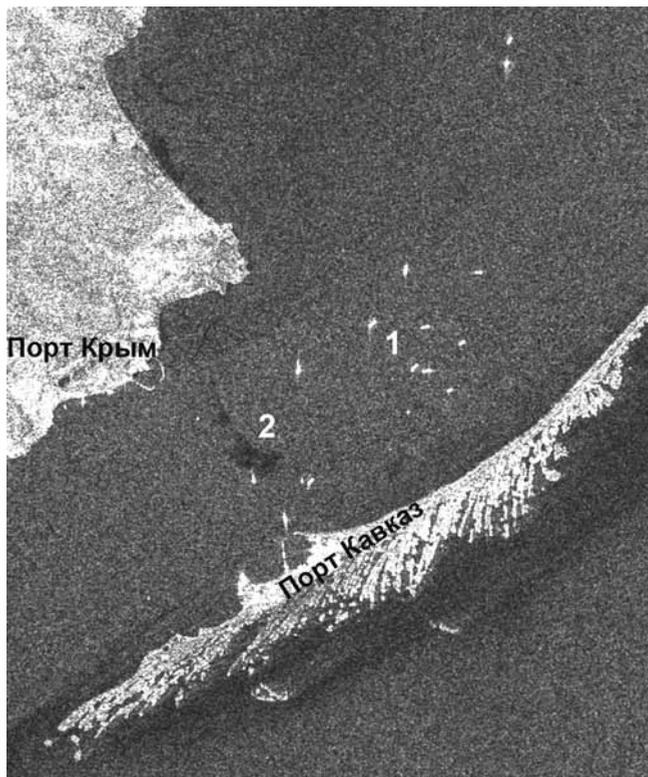


Рис. 8.4. Фрагмент (13×14 км) изображения, полученного со спутника Envisat ASAR 02.08.2006 г. в 19:28 UTC, разрешение 12,5 м: 1 — якорная стоянка судов; 2 — антропогенные загрязнения, связанные со сбросом с судна вод, содержащих нефтепродукты (© ESA, 2006)

Керченский пролив хронически болен и находится в состоянии постоянного антропогенного стресса, который вызван растущим количеством проходящих через него судов, а катастрофический разлив нефтепродуктов 11 ноября 2007 г. еще больше усугубил эту и без того очень непростую ситуацию.

Этой трагедии посвящено огромное количество статей, как в научных изданиях (Фашук, 2009; Овсиенко и др., 2008; Иванов и др., 2008; Лаврова и др., 2009а) и популярных журналах (Фашук, 2008), так и в сети Интернет. Причем отсутствие правдивой и полной официальной информации породило, особенно в первые дни после катастрофы, большое количество панических и спекулятивных публикаций. Неурегулированные с 1991 г. разногласия, касающиеся вопроса морской границы между Россией и Украиной, а также правил судоходства в Керченском проливе, после катастрофы проявились с новой силой. Особенно резко высказывались в публикациях в украинской прессе претензии (возможно, справедливые) к российским компаниям, которые в погоне за прибылью не соблюдали меры безопасности эксплуатации судов в столь сложном для судоходства районе, как Керченский пролив. Катастрофы с судами, в частности с танкерами, происходят во всем мире, а в данном случае метеоусловия, безусловно, были форс-мажорными.

8.1.1. Экстремальные метеорологические условия, вызвавшие гибель судов

По всем признакам шторм 10–12 ноября 2007 г. относится к ряду наиболее жестоких и разрушительных штормов на Черном море. В этот период европейская территория России находилась под влиянием обширного и глубокого циклона, центр которого медленно смещался по северу Европы. Формирование циклона началось 9 ноября 2007 г. в центре барической ложбины (972 гПа), простиравшейся от Скандинавии к югу Западной Европы.

10 ноября на юго-западной периферии этой области пониженного давления, над Италией и Балканами, сформировался вторичный циклон, который за сутки сместился с юга Италии через Балканский полуостров и северо-запад Турции в направлении Крымского полуострова. Давление в нем упало на 20 гПа. Со скоростью 70 км/ч он устремился в сторону Крыма (Фащук, 2008; 2009; Овсиенко и др., 2008). Горизонтальные барические градиенты между циклоном и антициклоном на юго-востоке моря увеличились и достигали 3–4 гПа на 1° меридиана. Скорость движения циклона составила порядка 80–85 км/ч (рис. 8.5).

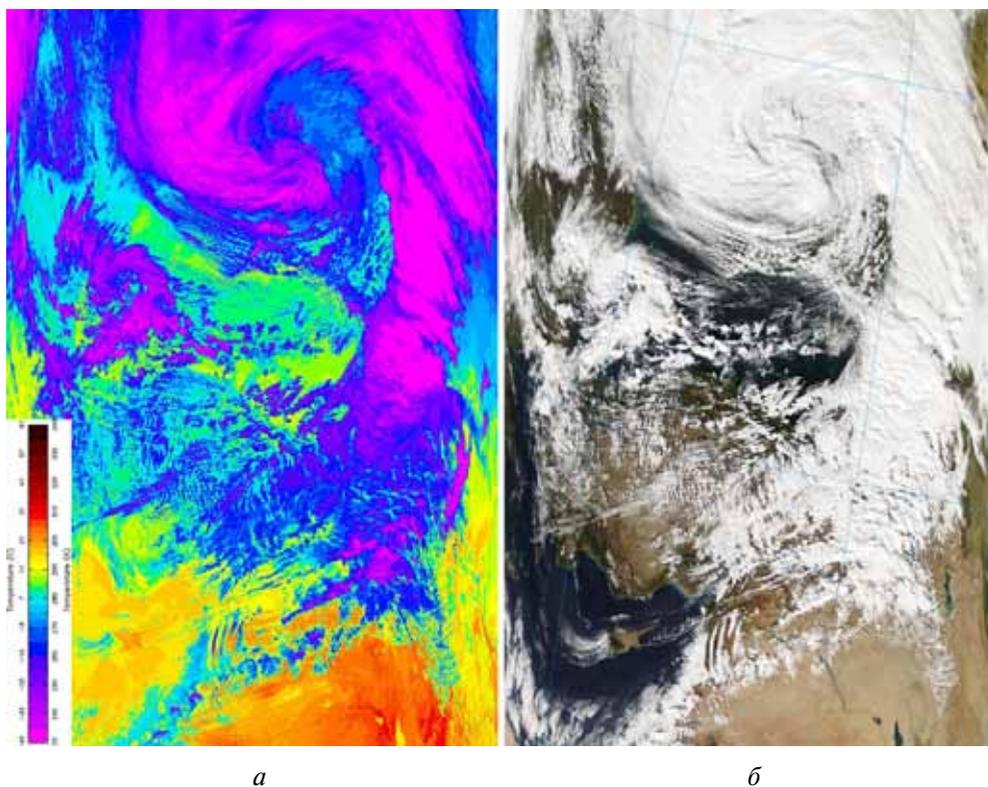


Рис. 8.5. Проявление атмосферного циклона: *а* — в поле температур; *б* — на цветосинтезированном изображении, каналы 1-й, 4-й, 3-й. Данные MODIS Aqua от 11.11.2007 г. 10:40 UTC, разрешение 2 км

Углубление циклона вызвало увеличение радиуса зоны максимальных скоростей ветра и их возрастание над акваторией моря. Утром 11 ноября скорость западного ветра в зоне юго-западного Крыма увеличились до 25–32 м/с (Севастополь, Украина), а высота волн, распространявшихся от юго-запада, достигала у м. Херсонес 3–5 м (Херсонесский маяк). Начиная с этого момента, область ураганных скоростей ветра, прилегающая к центру циклона с юго-востока, начала смещаться, в соответствии с траекторией циклона, через Черное море в Керченский пролив. К середине дня 11 ноября в северо-восточной части моря скорость юго-юго-западного ветра достигала 25 м/с (Феодосия, Украина), а волнение в южной части Керченского пролива составило 4–5 м. В Керченском проливе близи о-ва Тузла в середине дня 11 ноября средняя скорость ветра (без учета порывов) достигала 30–35 м/с.

Шторм принес южный ветер небывалой силы, который гнал волну в Керченский пролив, похожий на бутылочное горлышко с «пробкой» в виде косы Тузла. По мере приближения к ней глубина пролива уменьшается. Это привело к тому, что на мелководье морское волнение разрушалось, появились крутые нелинейные волны, высота которых при глубинах в 8 м и ветре до 35 м/с достигала 6–7 м. За последние 50 лет волны максимальной высоты 2 м в северной части Керченского пролива наблюдались всего 9 раз и только при северных ветрах. Повторяемость ветров южной четверти составляет 12 %, но скорость таких ветров никогда не превышала 15–17 м/с, и двухметровые, а тем более четырех- и шестиметровые волны при таких ветрах в проливе не регистрировались ни разу (Фашук, 2009).

8.1.2. Хроника катастрофы

По данным капитана порта Керчь, на момент шторма 11.11.2007 г. на акватории Керченского пролива и в его азовском и черноморском устьях находилось 167 судов. Для большинства оказавшихся в этом районе судов типа «река-море» вызванная штормом нагрузка оказалась запредельной. Такие суда рассчитаны на волнение не более 2–2,5 м. По данным МЧС, утром 11 ноября в районе порта Кавказ находились 59 судов, из которых около 20 были нефтеналивными типа «река-море». Примерно такое же количество судов находилось на якорной стоянке на входе в Керченский пролив из Черного моря, и среди них — танкер типа «река-море» «Волгонефть-139» и сухогрузы «Вольногорск», «Ковель» и «Нахичевань». Как сообщил впоследствии капитан Керченского морского торгового порта и Президент Ассоциации капитанов портов Украины Валентин Пилипенко, 8 судов по рекомендации ЦРДС «Керчь» ушли штормовать в море, 7 судов потеряли якоря. Около 50 % судов испытывало дрейф на якорях. После получения известия о разломе танкера «Волгонефть-139» и трещины по палубе судна «Волгонефть-123» было принято решение снимать с якорей все суда и переводить их в северную часть Керченского пролива. Была выполнена уникальная операция по проводке 47 судов по Керчь-Еникальскому каналу в условиях ограниченной видимости и ураганного ветра, порывы которого достигали 38,8 м/с. Суда «Нахичевань», «Вольногорск» и «Ковель», которые по неизвестным причинам остались стоять на якорях, затонули в различных точках Керченского пролива, имея на борту груз с серой. С потерпевших судов всего было спасено 37 чело-

век. Из экипажа теплохода «Нахичевань» четыре человека пропали без вести, четверо утонули.

В 04:50 (время московское) 11 ноября 2007 г. нефтеналивное судно «Волго-нефть-139», перевозившее 4777 тонн мазута, разломилось в районе якорной стоянки с южной стороны о-ва Тузла. Заякоренная носовая часть танкера после аварии осталась на месте, а корму под действием ветра и течений отнесло к острову и выбросило на мель. По официальным данным, из носовой части танкера за 12 часов вытекло 1000 т мазута, из кормовой — еще 600 т. Нет точной информация о количестве разлитого мазута, попавшего в море в период катастрофы, и его свойствах. Предполагается, что в море после шторма поступил не только мазут из танкера «Волго-нефть-139», но и нефтепродукты из выброшенных на мель других судов, которые пытались спасти, сливая балластные воды, содержавшие солянку, а, возможно, и топливо бункера. Это предположение подтверждается данными авиационной разведки места событий, выполненной силами МЧС России сразу же после шторма, а также спутниковыми радиолокационными наблюдениями.

Всего, по данным МЧС, 11 ноября 2007 г. в результате штормового ветра и сильного волнения в Керченском проливе: затонуло 4 судна (сухогрузы «Вольногорск», «Нахичевань», «Ковель», «Хачь Измаил» (Грузия)); сорвало с якорей и выбросило на мель 6 судов (сухогрузы «Вера Волошинская» (Украина), «Зияя Кос» (Турция), «Капитан Измаил» (Турция), баржи «Дика», «Диметра», плавкран «Севастополь»). На дне оказалось около 6800 т технической серы, находившейся в трюмах этих кораблей. Получил повреждение танкер «Волго-нефть-123» и разрушился «Волго-нефть-139».

8.1.3. Результаты обследований МЧС России и Украины в Керченском проливе 12–16 ноября 2007 г.

Уже в 9 часов утра 12 ноября водолазный катер МЧС Украины обследовал побережье о-ва Тузла, а к 14 часам — акваторию пролива в районах затонувших кораблей. По результатам обследования визуально плавающих пятен мазута с танкера «Волго-нефть-139» обнаружено не было. Отмечались отдельные куски мазута на фоне морской поверхности, покрытой пленкой легких фракций нефти (дизельного топлива), поступавшей в море из бункеровочных танков трех других затонувших в проливе кораблей — «Нахичевань», «Вольногорск», «Ковель».

Силами МЧС России в период с 09:30 по 12:30 14 ноября 2007 г. было выполнено вертолетное обследование нефтяного загрязнения пролива и картирование пятен мазута на его акватории и побережье (рис. 8.6, см. с. 402; табл. 8.3, см. с. 403). Основные разливы мазута спустя три дня после катастрофы были зафиксированы в районе расположения затонувшего носа и севшей на мель кормы танкера «Волго-нефть-139», а также на побережье косы Чушка (точки 12–15 на рис. 8.6, табл. 8.3).

Источником шлейфа легких фракций нефтепродуктов, зафиксированного у входа в Керченский пролив со стороны Азовского моря и вдоль северного побережья Керченского полуострова (точки 16–17 на рис. 8.6), стали, очевидно, десятки судов, штормовавшие в это время в Азовском море. Остальные обнаруженные в море пятна нефтепродуктов могли быть следствием аварии танкера «Волго-нефть-139».

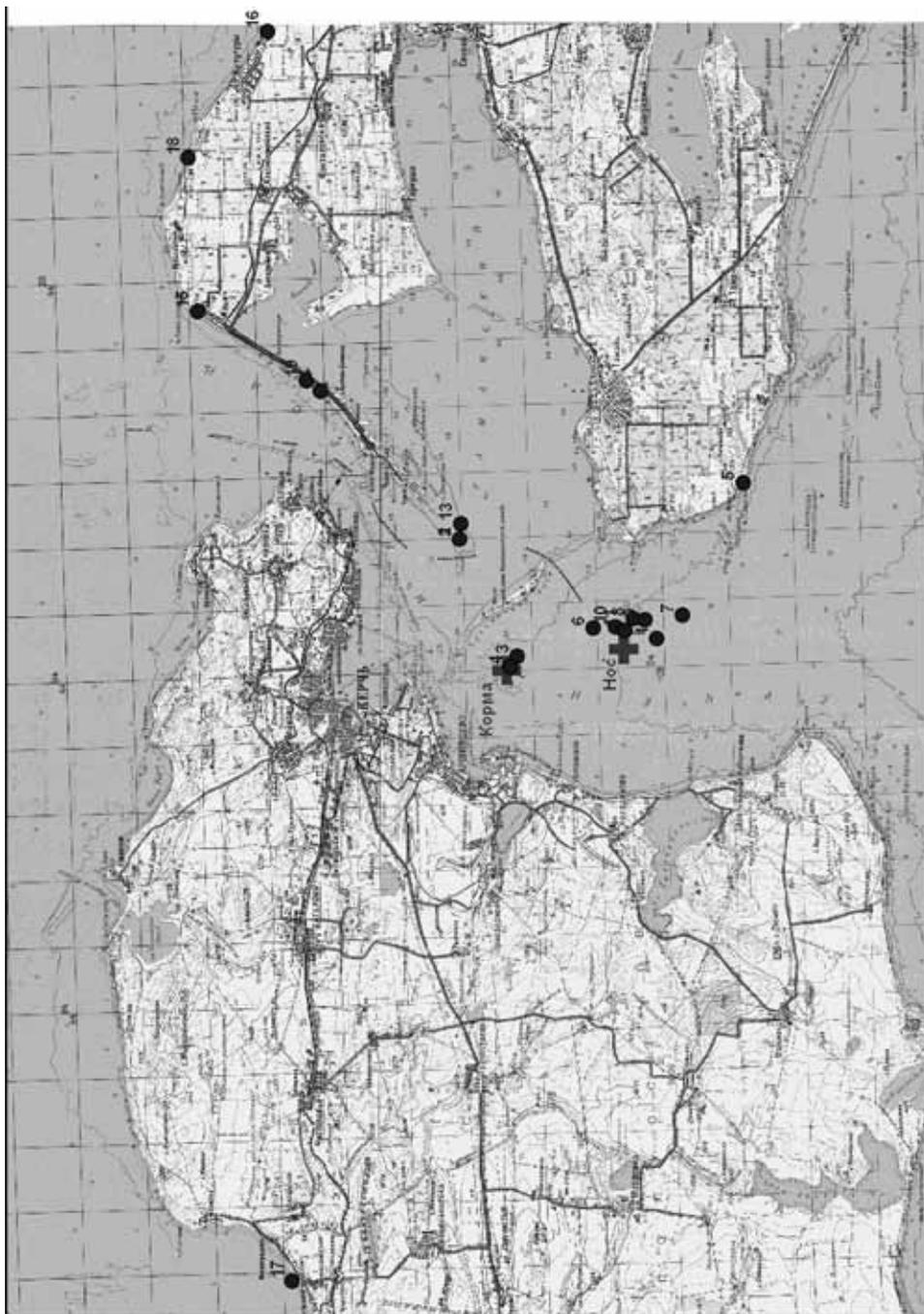


Рис. 8.6. Результаты вертолетного обследования МЧС России (14.11.2007 г., 10:00–12:00) последствий катастрофы танкера «Волго-нефть-139» в Керченском проливе: цифры — номера объектов в табл. 8.3 (см. с. 403)

Таблица 8.3. Координаты разливов мазута после аварии танкера «Волгонефть-139» 11 ноября 2007 г. (по данным вертолетного обследования)

№ п/п	Координаты (с. ш. / в. д.)	Наименование объекта
1	45°17'48 / 36°36'2	Пятно мазута
2	45°17'48 / 36°36'2	Корма «Волгонефть-139»
3	45°15'56 / 36°30'8	Пятно мазута
4	45°15'8 / 36°30'3	2 пятна по 50 м ² , 4 пятна по 10 м ²
5	45°08'22 / 36°38'8	Сплошное пятно мазута около 200 м ²
6	45°12'65 / 36°32'043	Легкая фракция примерно 200 м ²
7	45°10'20 / 36°32'732	Начало шлейфа от носовой части «Волгонефть-139»
8	45°11'80 / 36°32'50	Конец Г-образного шлейфа
9	45°11'44 / 36°32'50	Пятно мазута — шлейф
10	45°12'36 / 36°32'154	Край пятна от носовой части «Волгонефть-139»
11	45°12'08 / 36°32'0	2 пятна: 1 — 200 м ² ; 2 — 400 м ²
12	45°11'5 / 36°31'64	Пятно легкой фракции 100 м ²
13	45°17'45 / 36°36'90	Пятно мазута 60 м ²
14	45°22'0 / 36°43'1	2 больших пятна на берегу
15	45°26'0 / 36°46'70	Крайняя точка берегового загрязнения
16	45°23'67 / 36°59'65	Начало шлейфа легкой фракции
17	45°22'79 / 36°01'86	Окончание шлейфа; ширина 150–200 м легкой фракции
18	45°26'29 / 36°53'80	Трава с мазутом, площадь — 200 м ²
19	45°22'47 / 36°43'48	Загрязнение береговой черты

8.1.4. Спутниковый мониторинг Керченского пролива в ноябре 2007 г.

К сожалению, с 1992 г., после того как прекратил свою работу радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), установленный на борту космического аппарата «Алмаз-1», на орбите нет ни одного российского радиолокатора, способного давать информацию для нужд науки, народного хозяйства и экологического контроля. В настоящее время для российских ученых наиболее доступными и эффективными считаются данные, получаемые с помощью РСА, установленных на европейских спутниках Envisat и ERS-2. Они имеют пространственное разрешение, наилучшим образом подходящее для решения задачи экологического мониторинга морской поверхности: 25×25 м при охвате одним кадром площади съемки 100×100 км и 150×150 м при размере кадра 400×400 км. РСА позволяет получать данные одновременно на двух поляризациях: VV и HH; или VH и VV; или HV и HH. Для решения задачи выявления нефтяных загрязнений морской поверхности лучше всего подходят изображения, полученные на VV-поляризации. Данные канадских спутников RADARSAT 1/2, также имеющих на борту РСА, поставляются только на коммерческой основе, и из-за высокой стоимости они практически недоступны российским ученым.

Поскольку, как отмечалось выше, Россия не является членом Международной Хартии «Космос и крупные бедствия», официального запроса на проведение космической съемки района бедствия сделано не было. Через несколько часов после появления информации о разливе нефти в Керченском проливе специалистами ИКИ РАН был сделан запрос в службу заказов данных Европейского космического агентства (ЕКА), с которой сотрудники лаборатории аэрокосмической лаборатории ИКИ РАН успешно работают длительное время, о проведении экстренной внеочередной радиолокационной съемки в районе аварии. Ближайший по времени пролет спутника Envisat над проливом должен был состояться 13 ноября, т. е. через 2 дня после аварии. Однако ЕКА принимает плановые заказы не позднее, чем за 2 недели. В порядке исключения оно согласилось провести незапланированную съемку, только начиная с 16 ноября. Как отмечалось выше, вследствие сложных метеорологических условий авиаразведка (вертолетное обследование) нефтяного загрязнения пролива и картирование пятен мазута были проведены силами МЧС России только 14 ноября (через 3 дня после катастрофы) (Фащук, 2009). Оптическая съемка из космоса из-за сплошной облачности оказалась неинформативной.

Первыми радиолокационными изображениями (РЛИ), ставшими достоянием широкой общественности, стали полученные и обработанные ИТЦ «Сканэкс» данные RADARSAT-1 от 15 ноября в 15:34 UTC и 16 ноября в 03:45 UTC (Иванов и др., 2008). Через 7 мин после этого была проведена съемка района катастрофы с помощью новейшего радиолокатора, установленного на спутнике немецкого космического агентства (DLR) TerraSAR-X, на горизонтальной и вертикальной поляризациях с разрешением 3 м. Исходные снимки с TerraSAR-X были переданы лично заведующей аэрокосмической лаборатории ИКИ РАН О. Ю. Лавровой в рамках международного проекта MOPEL (Бочарова и др., 2008). Эти данные представляли наибольший интерес поскольку они были получены с очень высоким пространственным разрешением, а также потому, что, в отличие от данных RADARSAT, выставленных в сети Интернет с низким разрешением, они позволяли осуществлять точную географическую привязку. 16 ноября в 19:39 UTC была проведена радиолокационная съемка со спутника Envisat на вертикальной поляризации с разрешением в точке 12,5 м. Все это сделало возможным провести сравнение данных спутниковых и вертолетных наблюдений, полученных с разницей в 2 дня, и проследить за распространением загрязнения.

На рис. 8.7 представлены фрагменты радиолокационных изображений RADARSAT-1 (рис. 8.7а, см. с. 405), TerraSAR-X (рис. 8.7б, см. с. 406) и Envisat ASAR (рис. 8.7в, см. с. 407). На всех трех РЛИ однозначно идентифицировался практически точечный источник загрязнений — носовая часть танкера «Волго-нефть-139». Загрязнений, распространяющихся от места посадки на мель кормовой части, уже не наблюдалось. Пятна в районе кормовой части были выявлены в момент проведения авиаразведки 14 ноября, но 15 ноября она была отбуксирована в порт Кавказ и перестала быть источником загрязнений.

На всех трех РЛИ вторым точечным источником, от которого распространяется шлейф загрязнений, оказалась западная оконечность дамбы косы Тузла. По всей видимости, в предыдущие дни сильное черноморское течение выбросило на берег большое количество мазута, который скопился между камнями, а в дальнейшем вымылся, и нефтяная пленка распространялась на север в сторону косы Чушка, а также в Таманский залив.

Наибольший интерес, с точки зрения авторов книги, представляют обширные темные области пониженного радиолокационного рассеяния, занимающие практически всю северную акваторию пролива. Особенно впечатляюще это выглядит на утренних снимках (см. рис. 8.7а, б). Хотя модельные расчеты, проведенные специалистами ГОИН (Овсиенко и др., 2008) и показывают, что загрязнения должны были распространяться вдоль косы Чушка (рис. 8.8, см. с. 408), но представляется маловероятным, что вся эта темная область пониженного радиолокационного рассеяния обусловлена исключительно разливом мазута из танкера «Волгон нефть-139». Гораздо более вероятно, что эта огромная сликообразная область обусловлена пленочными загрязнениями, вызванными попаданием на морскую поверхность легких фракций нефтепродуктов из других судов, застигнутых штормом в азовском устье пролива. Скопление судов в виде ярких белых точек хорошо видно на всех трех РЛИ.

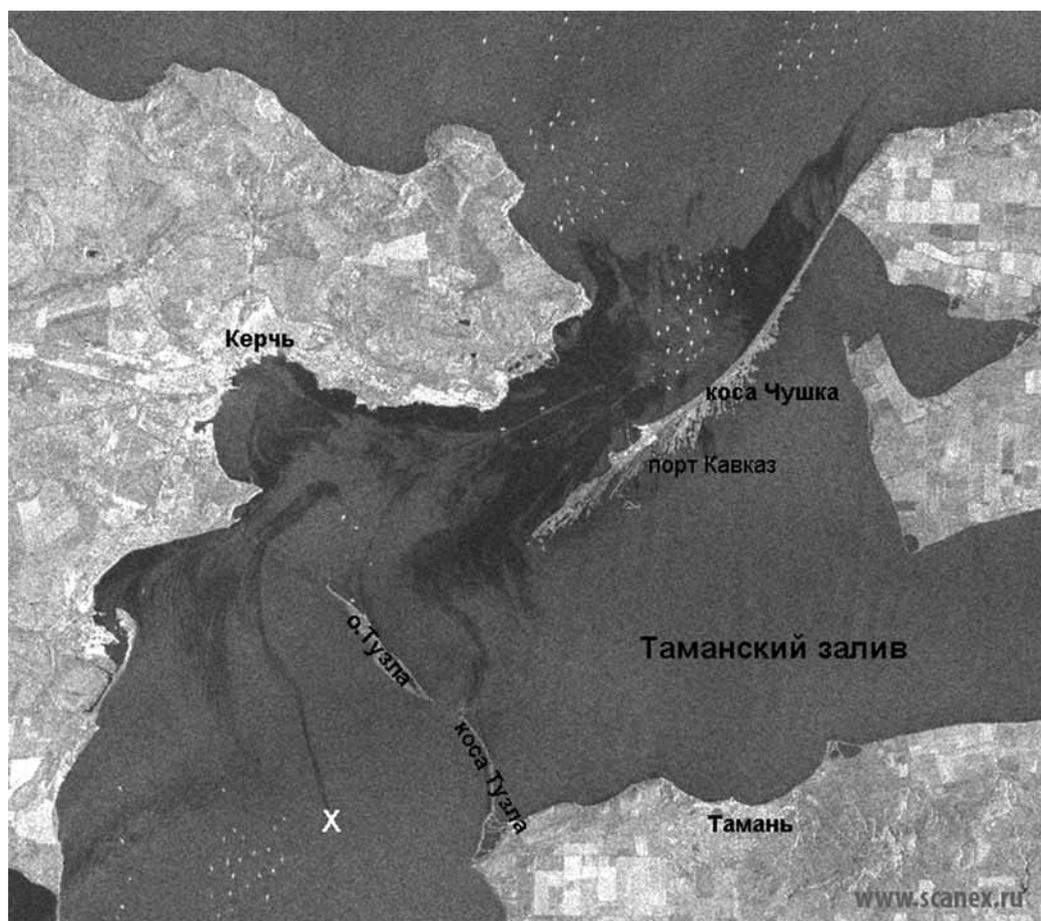


Рис. 8.7а. Спутниковая радиолокационная съемка Керченского пролива 16.11.2007 г., через 5 дней после катастрофы. Крестиком отмечено положение носовой части танкера «Волгон нефть-139»: фрагмент изображения, полученного со спутника RADARSAT-1 в 03:45 UTC (© CSA, ИТЦ «СканЭкс», 2007)



Рис. 8.7б. Спутниковая радиолокационная съемка Керченского пролива 16.11.2007 г., через 5 дней после катастрофы. Крестиком отмечено положение носовой части танкера «Волго-нефть-139»: фрагмент изображения, полученного со спутника TerraSAR-X в 03:52 UTC с разрешением 3 м (© InfoTerra, 2007)

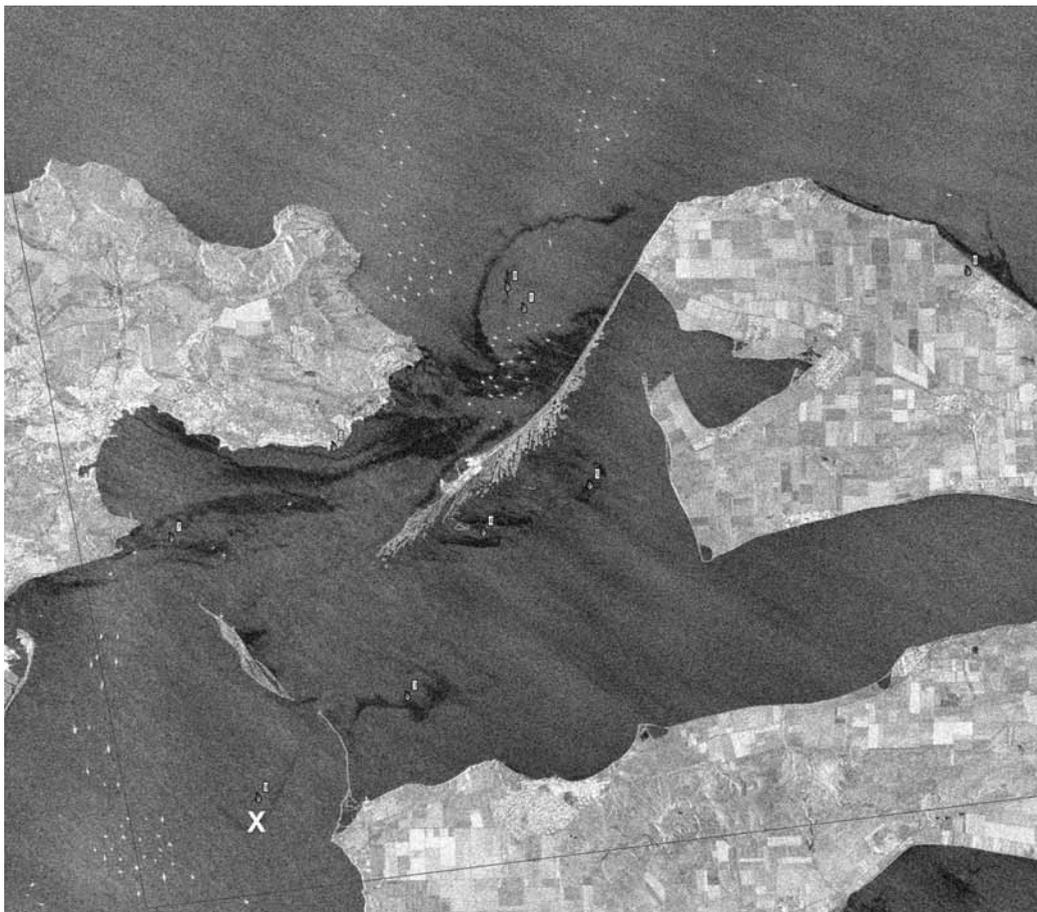
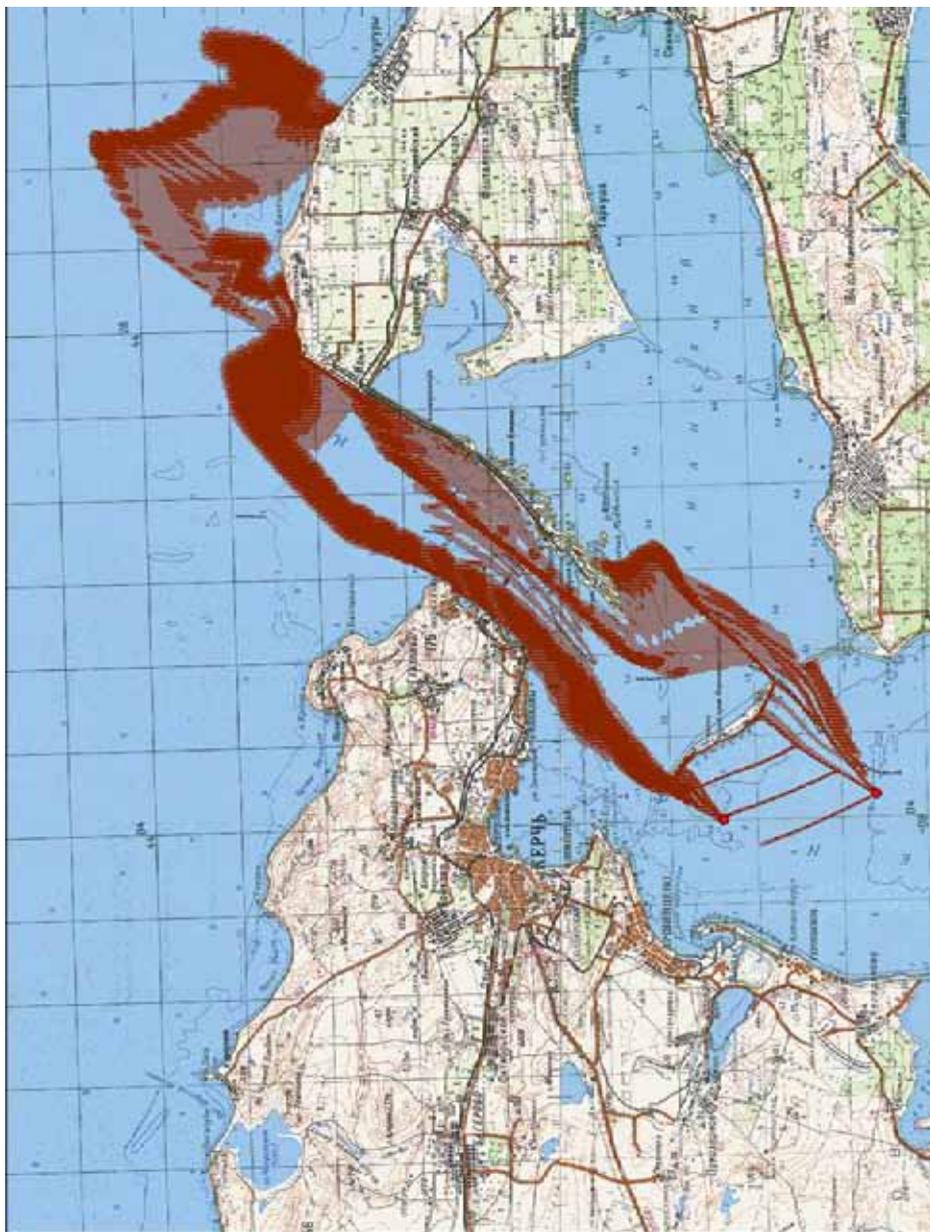


Рис. 8.7в. Спутниковая радиолокационная съемка Керченского пролива 16.11.2007 г., через 5 дней после катастрофы. Крестиком отмечено положение носовой части танкера «Волго-нефть-139»: фрагмент изображения, полученного со спутника Envisat ASAR в 19:39 UTC с разрешением 12,5 м (© ESA, 2007)

О том, что в воды Керченского пролива попал не только мазут с разломившегося танкера, но еще и достаточно большое количество нефтепродуктов именно в северной части пролива, свидетельствует любопытный документ — «Справка-доклад по состоянию на 18:00 часов по обстановке, сложившейся в Керченском проливе в районе порта „Кавказ“ и в районе порта „Новороссийск“ в результате сильного ветра и неблагоприятных погодных условий на территории Краснодарского края», направленный в адрес ОД ГУ МЧС России по Краснодарскому краю 11 ноября, т. е. в день катастрофы через 12 часов после аварии танкера. В нем, в частности, говорится: «В районе пос. Ильич на берегу обнаружено пятно мазута длиной 800 м и шириной 10 м». Следует подчеркнуть, что это пятно было обнаружено уже через 12 часов после аварии. Модельные расчеты предсказывали распространение мазутного пятна от танкера в этот район только через 48 часов.



Р и с. 8.8. Акватории Керченского пролива и Азовского моря, находившиеся 11–15 ноября 2007 г. под воздействием разлива мазута из танкера «Волgoneфт-139» (расчёт по гидродинамической модели SPILLMOD выполнен С. Н. Овсиенко, С. Н. Зацепой, А. А. Ивченко)

Интересно сравнить результаты оценки площадей загрязненной морской поверхности, полученные на основе вертолетных и спутниковых наблюдений. По данным авиационной разведки размеры мазутных загрязнений оценивались в 200–400 м², чуть больше занимали области шлейфов легких фракций. Области же загрязнений, детектируемых на РЛИ, особенно в северной части пролива, занимали десятки квадратных километров. Такая существенная разница может быть объяснена, на взгляд авторов, тем, что к моменту первых РЛИ (16 ноября) практически весь мазут был выброшен на берег или осел на дно. При этом на поверхности остались лишь пленки нефтепродуктов, которые в пасмурную погоду, в отсутствие солнечного освещения, плохо различимы с вертолета, но четко идентифицируются на РЛИ.

8.1.5. Спутниковый мониторинг Керченского пролива летом 2008 г.

Сразу после катастрофы экологи предсказывали, что в результате летнего прогрева воды опустившийся на дно мазут может всплыть и начнется вторичное загрязнение морской поверхности Керченского пролива. Вероятность всплытия комков мазута во время прогрева воды зависела от марки мазута, которую перевозил танкер. С трудом поддается объяснению тот факт, что эти сведения оказались недоступными для ученых, которые могли бы построить научно обоснованные прогнозы и провести численное моделирование распространения вторичных загрязнений. В ряде работ (Фашук, 2008, 2009) дается прогноз развития событий в весенне-летний период, исходя из подробного анализа поведения тех или иных марок мазута при разных температуре и солёности воды. Основной вывод таков:

- если танкер «Волгонепфть-139» перевозил мазут марки М-100/1015, то при реальных колебаниях температуры и солёности воды в Керченском проливе (1–25 °С и 11–18,4 ‰) такой мазут окажется тяжелее воды и с повышением температуры всплыть не сможет, так как прогрев воды и мазута идёт синхронно. Всплытие такого мазута возможно только если он прогреется до 22–25 °С, а температура воды при этом останется в пределах 0–7 °С, что абсолютно нереально;
- если в танках разломившегося судна находился мазут марки М-100/1000 или М-100/985, то после аварии все нефтепродукты должны были всплыть на поверхность, поскольку даже при температурах около 0 °С такой мазут легче воды, и тогда почти все его 1600 т могли оказаться после шторма на пляжах пролива, т. е. практически он не мог осесть на дно и, соответственно, нечему было бы всплывать летом;
- если в танках был мазут марки М-100/1010, то в процессе прогрева воды его всплытие возможно в диапазоне солёностей >15–20 ‰ (при черноморском потоке). При солёности 15 ‰ плавучесть такого мазута нейтральная, а при солёностях <15 ‰ он оказывается тяжелее воды пролива.

В последнем случае судьбу мазута, оставшегося на дне пролива, можно было попытаться предсказать, исходя из оценок преобладающих направлений и скоростей течений в весенне-летние месяцы. Если такие нефтяные агрегаты всплыли бы в открытой части акватории Керченского пролива между косой Чушка, о-вом Тузла

и крымским побережьем, то их в течение суток вынесло бы из пролива (учитывая высокие скорости течений — до 3 км/ч). Вероятность выброса агрегатов на побережье после южных штормов, несущих солёную воду (более 15 ‰), была бы наиболее высокой вдоль береговой линии косы Чушка, пос. Капканы, Опасное, Жуковка, Керченской бухты (Фащук, 2008).

В рамках оперативного спутникового мониторинга состояния вод и загрязнений российской акватории Черного и Азовского морей (см. гл. 4) пристальное внимание уделялось району Керченского пролива. Спутниковые наблюдения в весенне-летний период не выявили загрязнений поверхности пролива на больших акваториях, чего можно было ожидать при массовом всплывании комков мазута при прогреве воды.

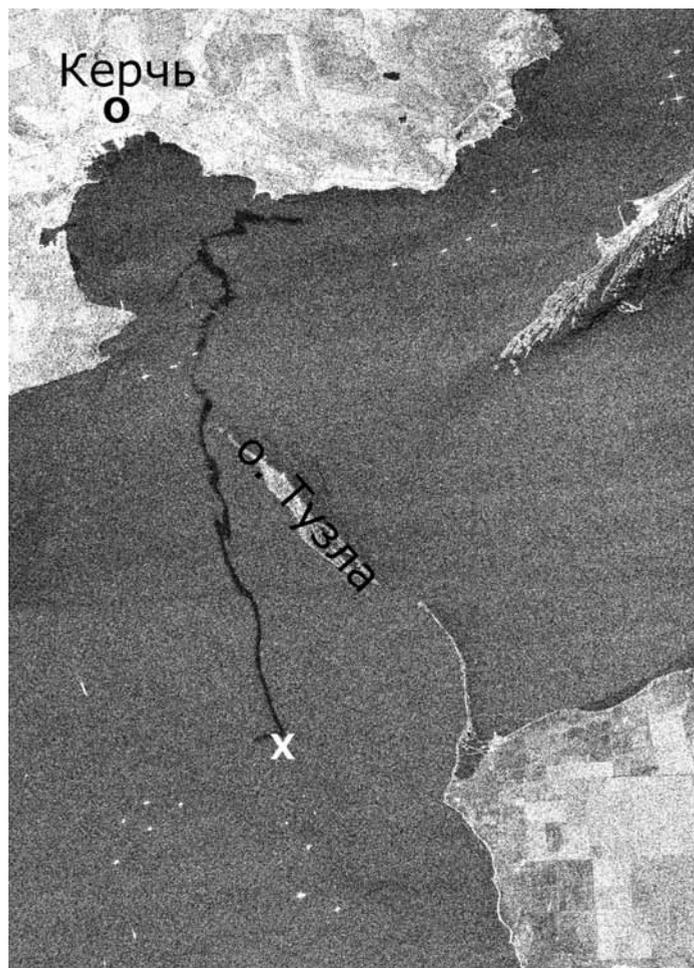


Рис. 8.9а. Вторичные загрязнения морской поверхности в Керченском проливе пленками нефтепродуктов летом 2008 г.: фрагмент (17×23 км) изображения, полученного со спутника Envisat ASAR 18.07.2008 г. 19:25 UTC, разрешение 12,5 м (© ESA, 2008). Общая длина следа более 20 км. Крестиком отмечено положение носовой части танкера «Волgoneфть-139»



Рис. 8.9б. Вторичные загрязнения морской поверхности в Керченском проливе пленками нефтепродуктов летом 2008 г.: фрагмент изображения, полученного со спутника Landsat ETM+ 12.07.2008 г., разрешение 30 м. Общая длина выявленного загрязнения 8 км

Однако, начиная со второй декады июня 2008 г., на всех радиолокационных изображениях, полученных в районе Керченского пролива, наблюдались характерные пленочные загрязнения в виде темных узких полос, исходящих из одной точки и вытянутых на несколько километров по направлению, совпадающему с направлением ветра и течения в момент радиолокационной съемки. Причем выявленный на основе анализа РЛИ источник загрязнений в точности совпадал с положением затонувшей носовой части танкера «Волгонефть-139» (рис. 8.9а, см. с. 410). Эти загрязнения хорошо проявлялись и на оптических изображениях, полученных в безоблачные дни с помощью сенсора Landsat ETM+ (рис. 8.9б). Загрязнения морской поверхности пленками нефтепродуктов наблюдались вплоть до 16 августа 2008 г., когда была закончена

откачка мазута из носовой части танкера и завершена ее транспортировка в порт Кавказ (рис. 8.9в). Наиболее информативные снимки и результаты их обработки представлены в сети Интернет на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_moni.htm.

Обобщенная карта загрязнений в Керченском проливе в июне-августе 2008 г. представлена на рис. 8.10 (см. с. 413). Стрелками показаны скорость и направление ветра на момент радиолокационной съемки. Хорошо видно, что пленочные загрязнения распространялись под действием ветра и течения на несколько километров, выступая своего рода трассерами, позволявшими изучать циркуляционные процессы в Керченском проливе.

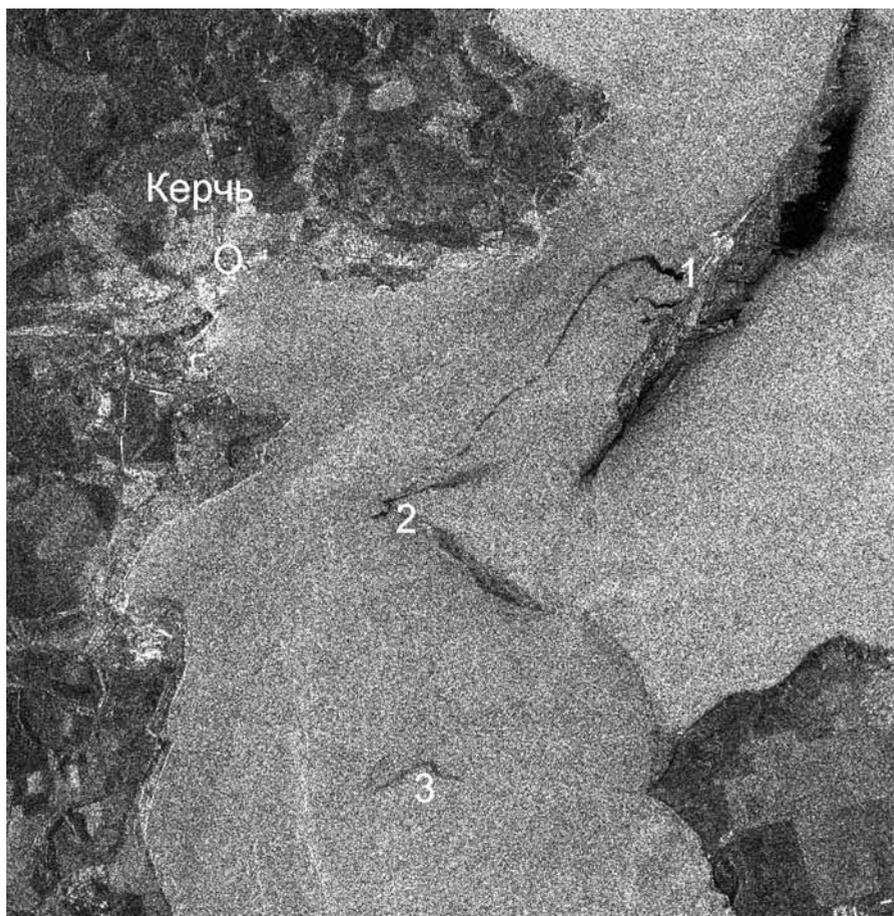


Рис. 8.9в. Вторичные загрязнения морской поверхности в Керченском проливе пленками нефтепродуктов летом 2008 г.: фрагмент (37×40 км) изображения, полученного со спутника Envisat ASAR 16.08.2008 г. 07:54 UTC, разрешение 12,5 м (© ESA, 2008). Длинный след загрязнений тянется от порта Кавказ (1) до западной оконечности о-ва Тузла (2). Вероятно, это последствия транспортировки носовой части в порт Кавказ с места аварии. Остаточные загрязнения, протяженность которых 3 км, наблюдаются и на месте аварии (3)

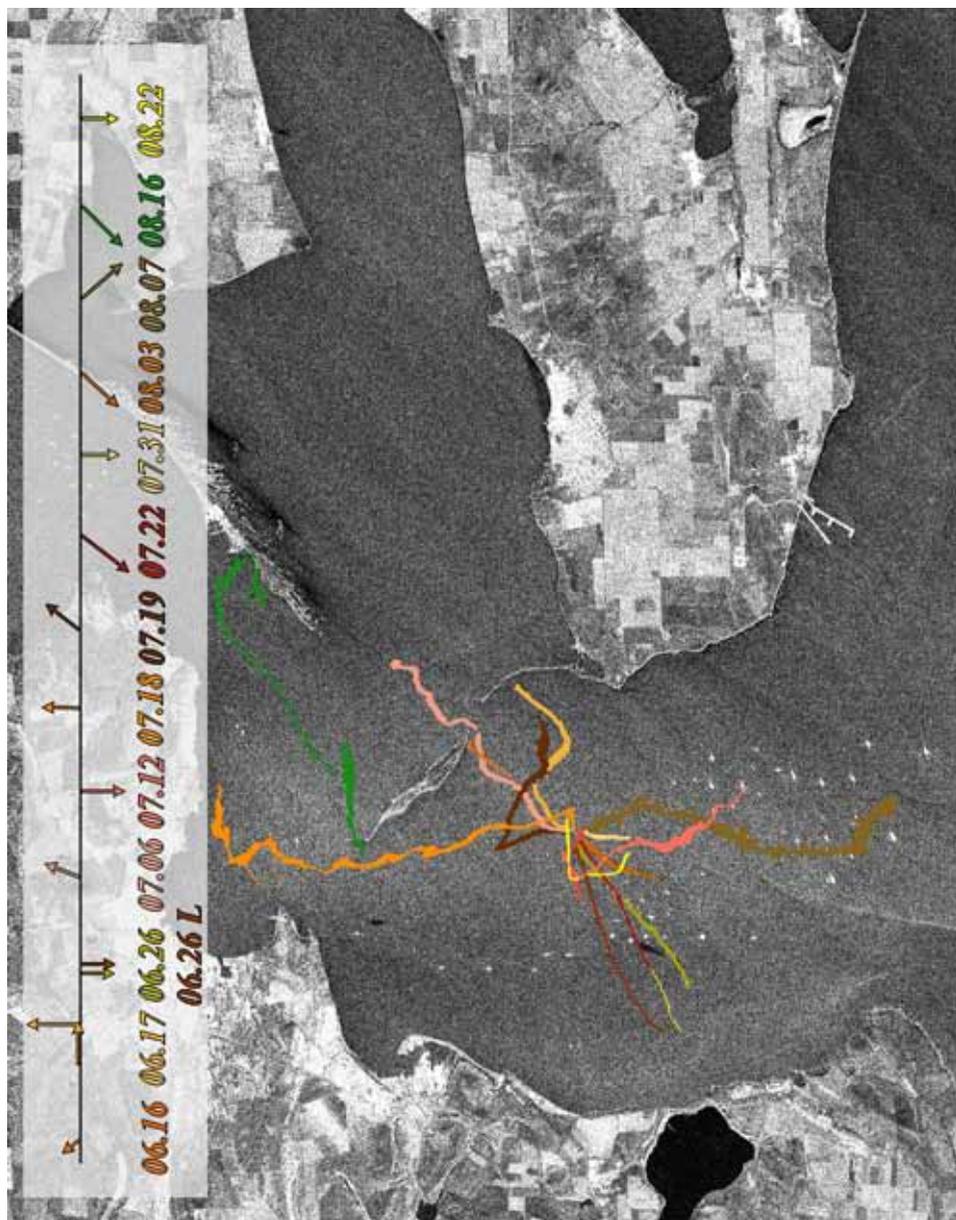


Рис. 8.10. Обобщенная карта загрязнений в Керченском проливе в июне-августе 2008 г. (по данным сенсоров Envisat ASAR, ERS-2 SAR и Landsat ETM+). Стрелками показаны скорости и направление ветра на момент космической съемки

8.1.6. Результаты натуральных наблюдений на косе Тузла

В сентябре 2008 г. были проведены визуальные наблюдения на косе Тузла и в районе станции Тамань (Лаврова и др., 2009а). К работе были привлечены помимо сотрудников ИКИ РАН студенты 3-го курса кафедры экологии и наук о Земле Международного университета природы, общества и человека «Дубна» (рис. 8.11а). Была тщательно обследована береговая полоса косы Тузла, побережье в районе ст. Тамань и порта Кавказ. В районе ст. Тамань никаких загрязнений мазутом береговой черты, дна и водорослей не обнаружено. Был проведен опрос жителей, которые также не подтвердили выброс мазута на берег в течение всего периода после катастрофы. (Не исключено, правда, что они скрывают правдивую информацию, чтобы не отпугнуть туристов.)



а



б



в



г

Рис. 8.11. Фотографии, сделанные в сентябре 2008 г. на косе Тузла во время экспедиции: а — студентки 3 курса кафедры экологии и наук о Земле Международного университета природы, общества и человека «Дубна» Гусарова Аня и Рыбакова Инна с научным руководителем Лавровой О. Ю. (ИКИ РАН); б — полимеризованные пленки загрязнений мазутом, сохранившиеся на прибрежных камнях с ноября 2007 г.; в — свежие мажущиеся мазутные загрязнения, выброшенные на берег летом 2008 г.; г — водоплавающие птицы у северного берега косы Тузла

В то же время выявлены многочисленные загрязнения южного побережья косы Тузла мазутом, выброшенным на берег. Мазут скопился под камнями, припорошен песком, им загрязнены выброшенные на берег водоросли. Причем, помимо загрязнений осени 2007 г., имеющих вид твердых полимеризовавшихся пленок (рис. 8.11б, см. с. 414), наблюдались свежие мажущиеся мазутные загрязнения, выброшенные на берег летом 2008 г. (рис. 8.11в, см. с. 414). Это свидетельствует о том, что имели место вторичные загрязнения всплывшими из-за прогрева воды нефтепродуктами, скопившимися на мелководье после осенней катастрофы. Визуальный осмотр оконечности косы Тузла, куда сразу после катастрофы должно было попасть наибольшее количество мазута, не показал наличия загрязнений. Скорее всего, они были вымыты оттуда течением, которое в данном узком месте между косой и о-вом Тузла имеет характерную скорость 2–3 м/с. На северном берегу косы Тузла видимых загрязнений не оказалось. Многочисленная популяция птиц находится в удовлетворительном состоянии, и их количество по сравнению с наблюдениями прошлых лет, проводившимися сотрудниками ИКИ РАН визуально, не уменьшилось (рис. 8.11г, см. с. 414). Не наблюдалось и признаков угнетения колонии птиц.

Весной-летом 2008 г. межведомственные полевые исследования, выполненные в районе катастрофы танкера «Волгонефть-139», позволили подтвердить выводы и прогностические оценки возможной судьбы разлившегося мазута, сделанные на основании географо-экологического анализа (Фащук, 2008) и модельных расчетов динамики нефтяного разлива (Овсиенко и др., 2008). В течение весны-лета 2008 г. остатки мазута, оказавшиеся на дне пролива в зоне эпицентра катастрофы (косы Тузла



Р и с . 8.12. Популяция рапаны (*Rapana thomasiana thomasiana* Grosse) не пострадала в районе разлива мазута осенью 2007 г. (фотография Д. Фащука, лето 2008 г.)

и Чушка, о-ва Тузла), преобладающими течениями были вынесены за пределы его акватории, и к августу практически все дно, кроме локальных участков в глубине Таманского залива, оказалось очищенным от последствий катастрофы. Во время водолазных погружений у южного побережья о-ва Тузла, подвергшегося максимальному воздействию разлива мазута в период катастрофы танкера, на дне пролива (глубины 3–4 м) наблюдалось «буйство жизни» без малейших признаков мазута (рис. 8.12, см. с. 415). Аналогичная картина была отмечена в Тузлинской промоине и на входе в Таманский залив (Фашук, 2009).

8.1.7. Выводы и рекомендации

Катастрофы с танкерами случаются во всем мире и, как правило, в сложных погодных условиях. Данные дистанционного зондирования из космоса, в первую очередь полученные с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на борту искусственных спутников Земли, предоставляют уникальную возможность оперативно оценить размеры бедствия и проследить пути распространения загрязнений. Опыт катастрофы в Керченском проливе показал, что в условиях отсутствия собственных радиолокаторов спутникового базирования, необходимых для экстренного реагирования на чрезвычайные ситуации, должен быть отлажен механизм оперативного доступа (бесплатно или на льготных условиях) к зарубежным данным дистанционного зондирования. Для этого Российская Федерация должна войти в международную инфраструктуру распространения космической информации, которая сегодня объединяет все технологически развитые государства, а именно, присоединиться к Международной Хартии «Космос и крупные бедствия». В России высоко развиты методы обработки спутниковой информации, создана и отлажена система оперативного спутникового мониторинга. Сложившаяся кооперация учёных, занимающихся проблемами экологического мониторинга (ИКИ РАН, ИО РАН, МГИ НАНУ и др.), могла бы составить группу, в задачи которой входили бы оперативная обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли и оперативное доведение этой информации до структур, принимающих решения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 06-05-65177-а, 07-05-00565-а). Подспутниковые наблюдения на косе Тузла проводились в рамках экспедиционного проекта РФФИ № 08-05-10081-к. Спутниковые радиолокационные изображения Envisat ASAR предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов АО Bear 2775 и С1Р1027.

8.2. СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗЛИВА НЕФТИ В МЕКСИКАНСКОМ ЗАЛИВЕ В АПРЕЛЕ-АВГУСТЕ 2010 г.

Катастрофические разливы нефти происходят не только в результате аварий танкеров. 2010 год войдет в историю техногенных катастроф в Мировом океане гигантским масштабом нефтяного загрязнения в результате утечки нефти из скважины «Макондо», вследствие разрушения нефтяной платформы Deepwater Horizon, управляемой компанией British Petroleum (BP), 20 апреля 2010 г. (рис. 8.13). Платформа находилась



Рис. 8.13. Тушение пожара на платформе Deepwater Horizon 21 апреля 2010 г. Снимок с вертолета (©US Coastal Guard, Associated Press)

в северной части Мексиканского залива на расстоянии 210 км к юго-востоку от Нового Орлеана (штат Луизиана, США) и на расстоянии менее 100 км от дельты реки Миссисипи. Масштабность аварии и разлива нефти усугублялась непрерывным ее фонтанированием из скважины (с расходом около 800 тонн нефти в сутки), расположенной на глубине полтора километра, в течение трех месяцев.

В Мексиканском заливе, площадь которого составляет 1543 тыс. км², в эксплуатации находятся 634 платформы, а также 39 газовых вышек. Добычу нефти и природного газа здесь осуществляют более 30 компаний. Среднесуточный объем добычи нефти на шельфе составляет 1,6 млн баррелей в день, а природного газа — 6,6 млрд куб. футов в день (Жильцов и др., 2010).

Практически сразу после катастрофы руководство Геологической службы США (USGS) от имени береговой охраны страны обратилось в международную хартию «Космос и крупные бедствия» с просьбой о космическом мониторинге района катастрофы всеми возможными средствами. Начиная с 22 апреля, практически все космические сенсоры были переориентированы на съемку Мексиканского залива. В оперативном режиме производилась съемка, обработка и анализ данных сенсоров: MODIS Aqua/Terra; ASAR, MERIS Envisat; RADARSAT 1/2, TerraSAR-X. В настоящее время наиболее эффективным методом для обнаружения и мониторинга нефтяных загрязнений является спутниковое радиолокационное зондирование, вследствие всепогодности, независимости от времени суток и возможности проводить съемку с высоким пространственным разрешением (Lavrova et al., 2006b; Бедрицкий и др., 2007; Костяной и др., 2009). Однако интерпретация радиолокационных изображений имеет свои сложности, так как видимое на РЛИ выглаживание поверхностного волнения может быть вызвано как нефтяными загрязнениями, так и другими причинами, такими как: резкое ослабление приповерхностного ветра, цветение водорослей с образованием плёнки на поверхности, поверхностные проявления различных атмосферных

и океанических процессов и т. д. Другой недостаток спутникового радиолокационного зондирования в том, что съемка конкретной акватории выполняется раз в два-три дня (в отдельных случаях возможна съемка на нисходящем и восходящем витках, т. е. примерно через 12 часов). Такие ограничения существенны, когда речь идет об оперативном ежедневном мониторинге катастроф. Только комплексное использование оптических и микроволновых спутниковых данных может дать хороший результат (*Shcherbak et al.*, 2008; *Костяной* и др., 2009). Уже неоднократно было показано, что в условиях солнечного блика на морской поверхности нефтяные пятна великолепно наблюдались оптическими сканерами, которые проигрывают РСА в пространственном разрешении (25 и 250 м) и зависимости от условий съемки (облачность является помехой для оптических сканеров), но выигрывают по стоимости (бесплатно) и регулярности (ежедневно) получения снимков. Именно во многом благодаря оперативным данным оптических сканеров MODIS Aqua/Terra, безоблачной погоде и солнечному блику в районе катастрофы в Мексиканском заливе удалось ежедневно отслеживать эволюцию нефтяного загрязнения.

Российскими и украинскими специалистами в области спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морей и океанов работа по комплексному анализу мультисенсорных спутниковых и метеорологических данных района аварии в Мексиканском заливе началась с 20 апреля 2010 г., т. е. с первого дня аварии. Мониторинг проводился объединенными усилиями подразделений Института космических исследований РАН, Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института НАНУ.

Спутниковые изображения района катастрофы были получены уже в первый день работы. На них был отчетливо виден шлейф дыма, уходящий на юго-восток на расстояние 155 км (рис. 8.14).



Рис. 8.14. Дымный шлейф от пожара на платформе Deepwater Horizon. Фрагмент изображения MODIS Terra (композит 1-го, 4-го, 3-го каналов), полученного 21 апреля 2010 г. в 16:05 UTC с разрешением 250 м (©MODIS Rapid Response Team)

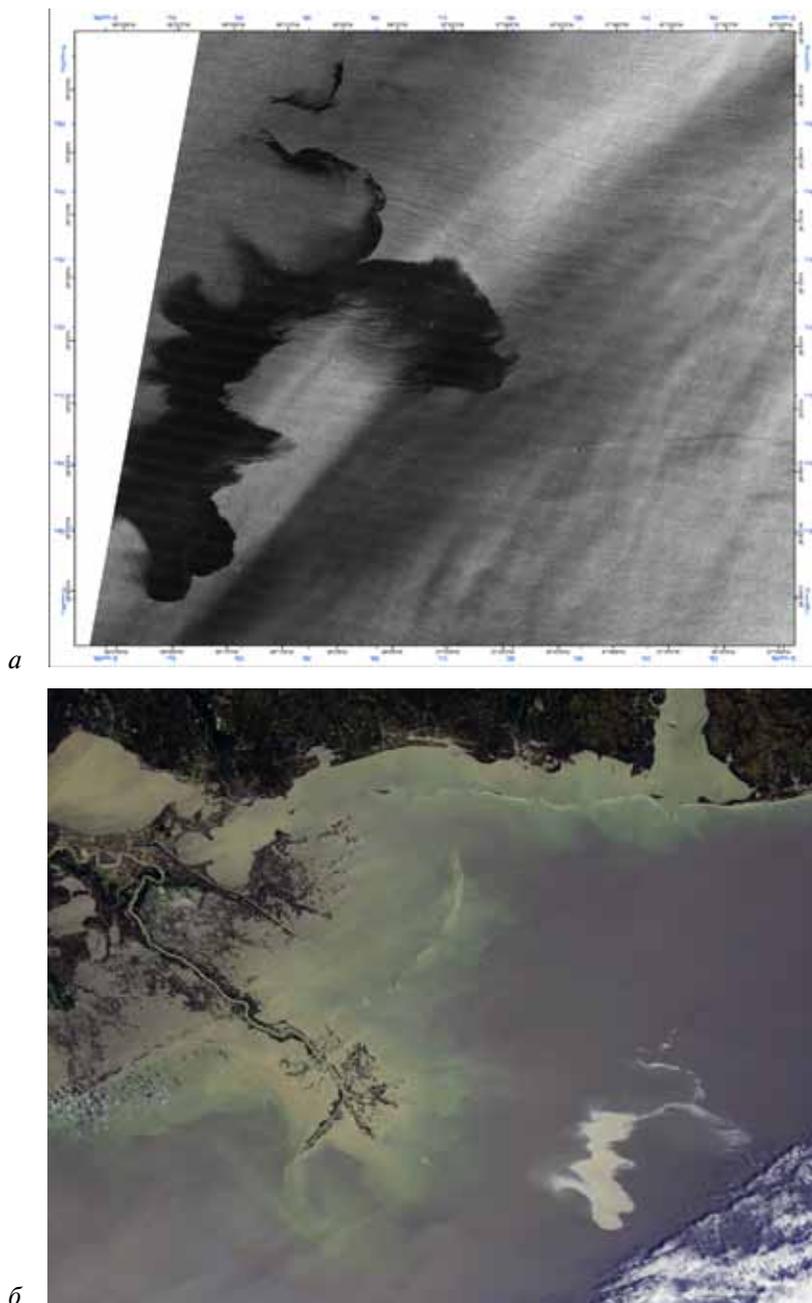


Рис. 8.15а, б. Проявление нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе на спутниковых изображениях от 25 апреля 2010 г.: а — радиолокационное изображение TerraSAR-X, полученное в 11:50 UTC с разрешением 16,8 м на VV-поляризации излучения и приема (©Astrium Services/Infoterra GmbH); б — цветосинтезированное изображение MERIS Envisat (композит 7-го, 5-го, 1-го каналов), полученное в 16:28 UTC с разрешением 260 м (© ESA, 2010)

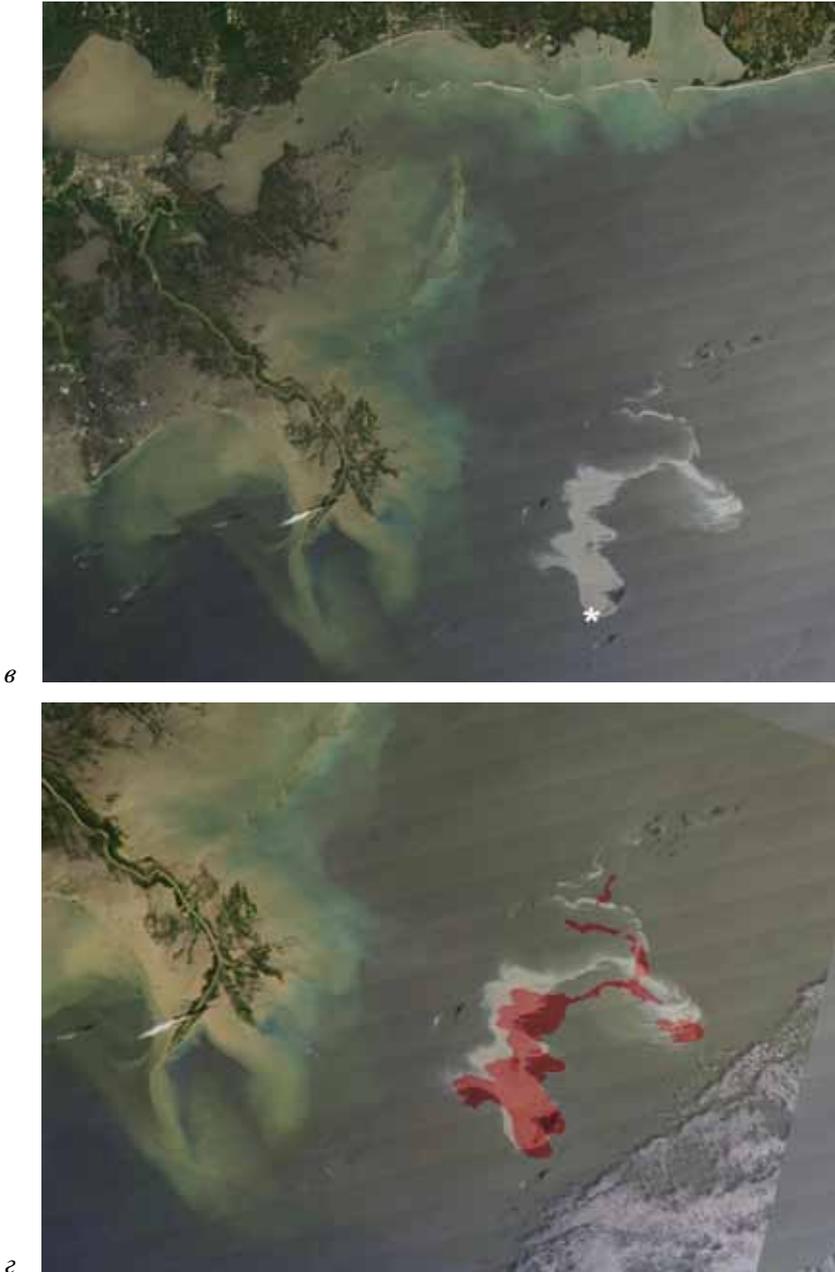


Рис. 8.15*а, б*. Проявление нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе на спутниковых изображениях от 25 апреля 2010 г.: *а* — цветосинтезированное изображение MODIS Aqua (комполит 1-го, 4-го, 3-го каналов), полученное в 18:55 UTC с разрешением 250 м в зоне солнечного блика, звездочкой отмечено место аварии (©MODIS Rapid Response Team); *б* — композиция двух оптических изображений, представленных на рис. *б* (светлое) и *в* (красное), показывающая распространение нефтяного пятна 25 апреля 2010 г. в течение 2,5 ч

В первую неделю после катастрофы пятно постоянно увеличивалось в размерах, но сохраняло компактность и четкие границы. 25 апреля 2010 г. над районом катастрофы были проведены: радиолокационная съемка немецким радиолокатором TerraSAR-X в 11:50 UTC с разрешением 16,8 м на вертикальной поляризации излучения и приема (рис. 8.15а, см. с. 419); оптическая съемка тремя сенсорами — MERIS Envisat в 16:28 UTC с разрешением 260 м (рис. 8.15б, см. с. 419); MODIS Terra в 17:20 UTC и MODIS Aqua в 18:55 UTC (рис. 8.15в, см. с. 420) с разрешением 250 м. За 7 часов между первой и последней съемкой нефтяное пятно практически не изменило свою форму. Оно несколько увеличилось в размере — его общая площадь составила 1000 км² — и сдвинулось в северо-западном направлении, несмотря на достаточно сильный западный ветер, скорость которого составляла 8 м/с (рис. 8.15г, см. с. 420). Можно сделать вывод, что на перенос загрязнения решающее действие оказали локальные течения в районе аварии, а не ветер.



Р и с . 8.16. Нефтяное загрязнение впервые достигло дельты Миссисипи. Цветосинтезированное изображение MODIS Terra от 29 апреля 2010 г. в 16:50 UTC. Композит 1-го, 4-го, 3-го каналов, разрешение 250 м. Снимок получен в зоне солнечного блика. Звездочкой отмечено место аварии (©MODIS Rapid Response Team)

Компактность и четкие границы пятна сохранились и через сутки, но площадь его увеличилась на 1000 км^2 . 29 апреля пятно, по-видимому, попало в циклонический вихрь, сильно изменило форму, площадь поверхностных загрязнений составила 2400 км^2 . От него стали отходить шлейфы нефтяных загрязнений до 75 км в длину (рис. 8.16, см. с. 421). Загрязнения впервые с момента аварии достигли берега в районе дельты Миссисипи. Остатки этого вихревого движения еще наблюдались 1 мая. Затем нефтяное пятно, которое постоянно подпитывалось за счет поступления нефти со дна моря, эволюционировало под действием слабых течений и ветра. На рис. 8.17 представлена композиция четырех радиолокационных изображений ASAR Envisat, показывающая распространение нефтяного пятна с 26 апреля по 2 мая 2010 г.

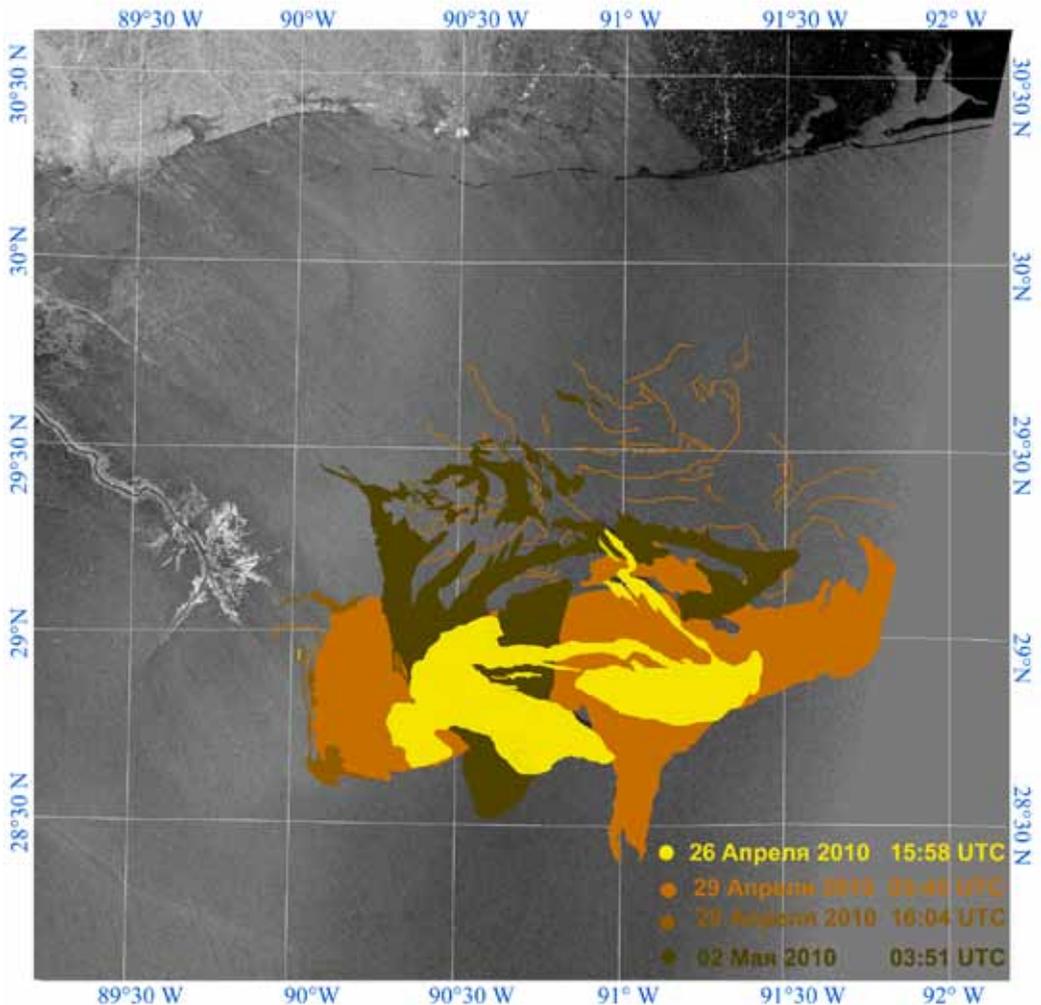


Рис. 8.17. Композиция четырех радиолокационных снимков ASAR Envisat, показывающая распространение нефтяного пятна с 26 апреля по 2 мая 2010 г.

8 мая 2010 г. компания ВР попыталась установить защитный купол, но из-за образования газовых гидратов его пришлось поднять.

Следует отметить, что течения в районе самой аварии достаточно слабы и не имеют постоянного направления, чем объясняется относительная компактность основного пятна размером примерно 60×80 км, выявленного 9 мая над источником загрязнения (рис. 8.18). За первые двадцать дней после аварии пятно сдвигалось преимущественно на север и северо-запад по направлению к берегу и дельте Миссисипи, оставаясь практически на одном и том же месте, лишь меняя свою форму и периодически достигая берега в разных местах. Например, характерным проявлением импульсного ветрового воздействия стало преобразование 8–9 мая бесформенного пятна в классическую дипольную структуру, направленную на юг (см. рис. 8.18), которая еще прослеживалась на снимках до 11 мая 2010 г.



Рис. 8.18. Нефтяное пятно в виде дипольной структуры. Фрагмент изображения ASAR Envisat (250×315 км), полученного 9 мая 2010 г. в 15:48 UTC с разрешением в точке 75 м. Общая площадь загрязнений составила более 3 тыс. км². Звездочкой обозначено место аварии (© ESA, 2010)

В середине мая в средствах массовой информации появились сообщения, что в море вытекает гораздо больше нефти, чем это было заявлено ранее ВР (800 т/сут). Дело в том, что специалистами компании, после нескольких попыток установить специальный короб на скважину, удалось довести уровень откачки нефти до 5 тыс. баррелей в сутки (около 700 т), однако размеры нефтяного пятна на поверхности океана не уменьшались, а скорее росли. Кроме того, океанографы США провели ряд зондирований толщи океана в этом районе и обнаружили на промежуточных глубинах гигантские «нефтяные облака» — слои нефти, «парящие» на воде на уровне своей плотности.

17 мая спутниковые изображения показали, что общая площадь загрязнения морской поверхности существенно возросла (с 11 до 16 тыс. км²) за счет гигантской «нефтяной» струи шириной от 40 км у основания до 10 км на ее конце и длиной до 300 км,двигающейся по дуге из района утечки нефти в юго-восточном направлении (рис. 8.19). Площадь только струи составила примерно 4700 км².



Рис. 8.19. Спутниковое изображение нефтяного загрязнения с образовавшейся струей по данным MODIS Terra от 17 мая 2010 г. 16:40 UTC. Снимок получен в зоне солнечного блика. Звездочкой отмечено место аварии. (©MODIS Rapid Response Team)

Все это говорит о том, что реальные значения утечки нефти в течение первого месяца были сильно занижены. К тому же, ее потоки начали распространяться также в западном направлении, огибая дельту Миссисипи. Практически вся южная и западная оконечности дельты подверглись нефтяному загрязнению. На оптических снимках практически невозможно выявить загрязнения в районе дельты, так как цветность и мутность вод Миссисипи сильно отличается от вод залива и на их фоне нефтяные загрязнения практически не видны. В то же время на РЛИ обтекание загрязненной струей дельты видно прекрасно (рис. 8.20).

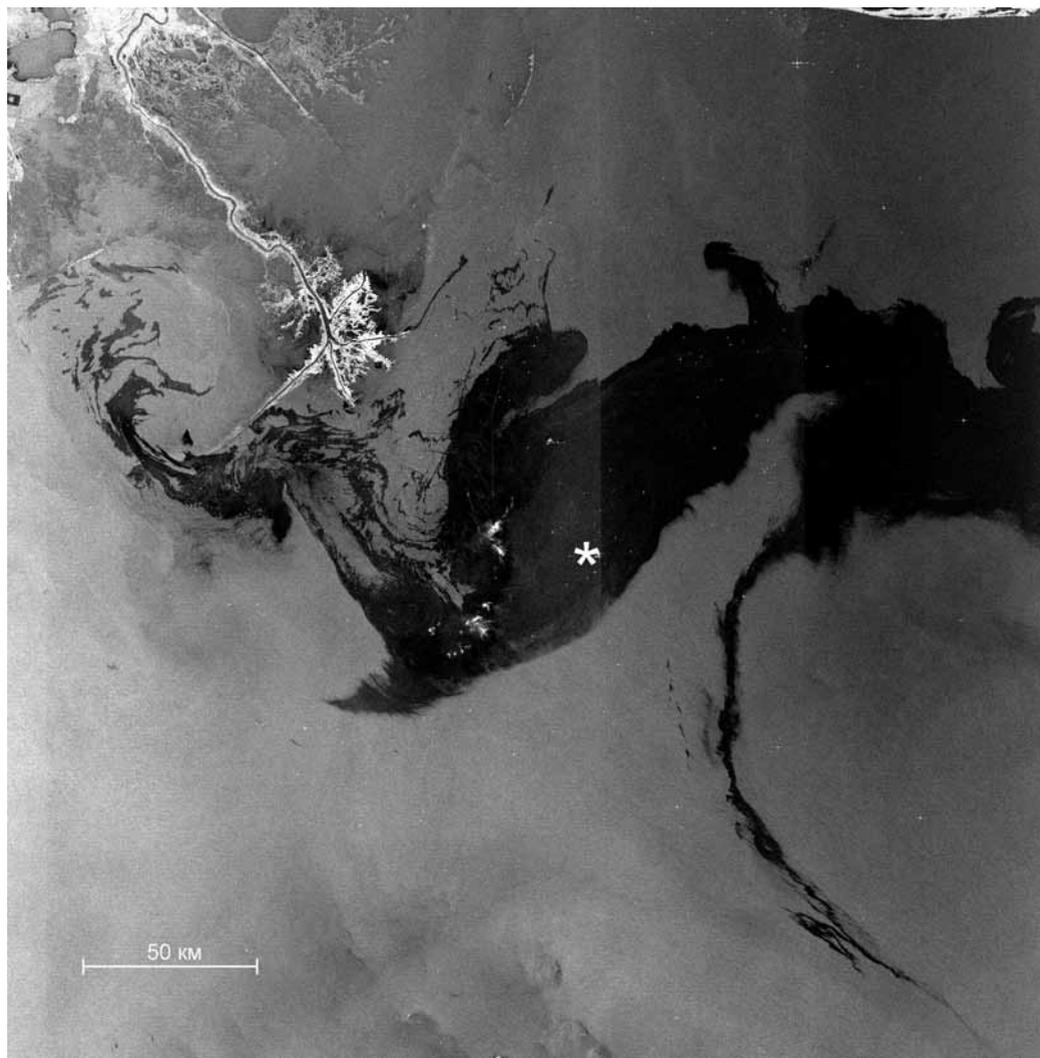
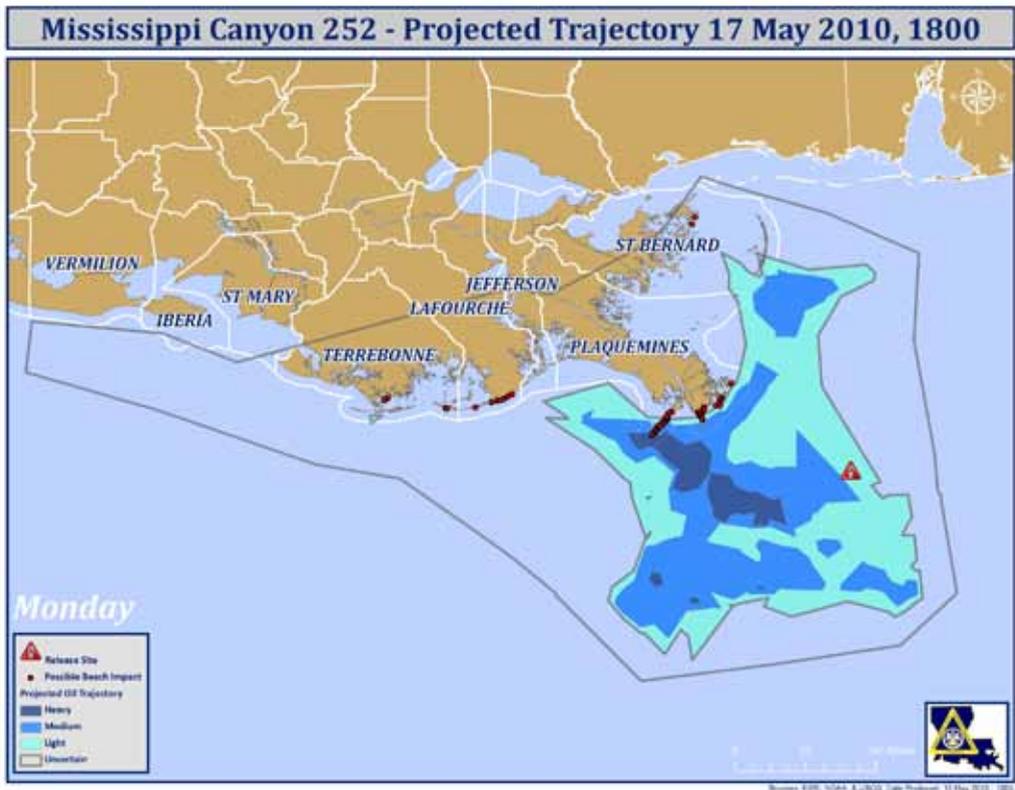


Рис. 8.20. Нефтяное загрязнение вокруг дельты Миссисипи и нефтяная струя, распространяющаяся в юго-восточном направлении. Фрагмент изображения ASAR Envisat (295×300 км), полученного 21 мая 2010 г. в 03:35 UTC. Звездочкой отмечено место аварии (© ESA, 2010)



Р и с . 8.21. Прогноз распространения нефтяного загрязнения на 17 мая 2010 г., составленный 15 мая 2010 г. (The Governor's Office of Homeland Security and Emergency Preparedness, Louisiana, USA)

Что касается причин образования струи, то оказалось, что это не результат действия узконаправленной струи ветра, поскольку ветер 15–17 мая был прямо противоположным по направлению — южным-юго-восточным. Следует отметить, что модельные расчеты, учитывающие только ветер и волнение, не предсказывали появление подобной струи. На рис. 8.21 представлен прогноз распространения нефтяного загрязнения на 17 мая 2010 г. 18:00, составленный 15 мая 2010 г. (The Governor's Office of Homeland Security and Emergency Preparedness, Louisiana, USA, <http://gohsep.la.gov/oilspill.aspx>). По прогнозу, учитывающему в первую очередь скорость и направление ветра, загрязнение должно было распространяться в окрестностях дельты Миссисипи и смещаться на север.

Проведенный же анализ данных о поле температуры поверхности океана (ТПО) показал, что нефтяное пятно частично попало в зону действия интенсивного и гигантского дипольного вихря общим поперечным размером 300 км, направленного на запад (рис. 8.22а, см. с. 427). Часть пятна была захвачена передним фронтом диполя и вовлечена в вихревое движение его циклоническим вихрем. Этим и объясняется наблюдаемая траектория движения струи.

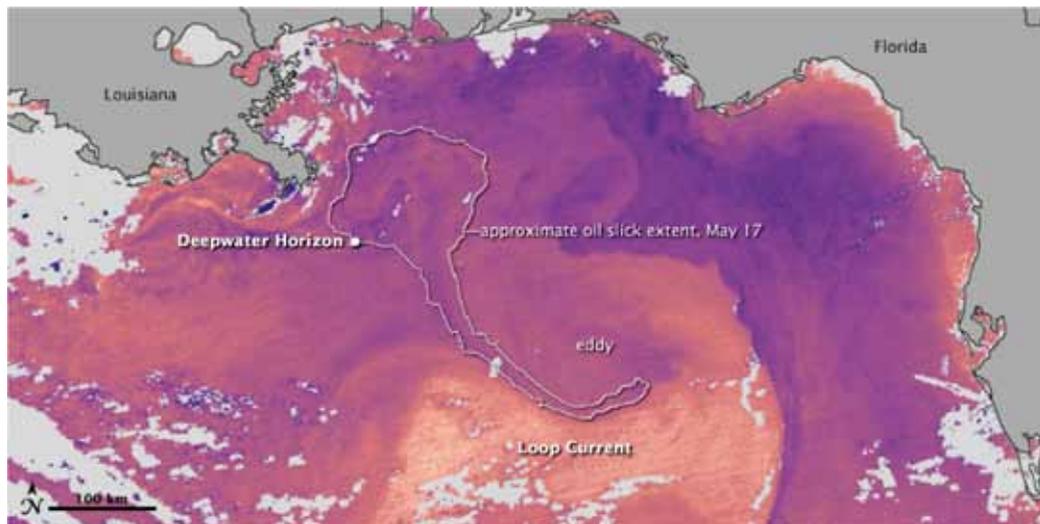


Рис. 8.22а. Положение «нефтяной струи» относительно гигантского дипольного вихря. Температура поверхности Мексиканского залива по данным MODIS Terra за 18 мая 2010 г. (©MODIS Rapid Response Team)

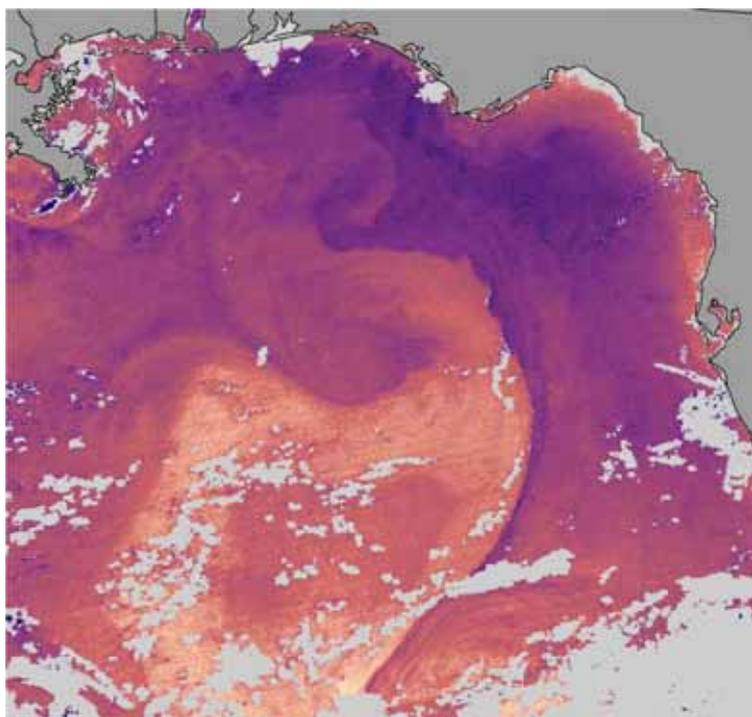


Рис. 8.22б. «Плотная упаковка» диполей. Температура поверхности Мексиканского залива по данным MODIS Terra за 18 мая 2010 г. (©MODIS Rapid Response Team)

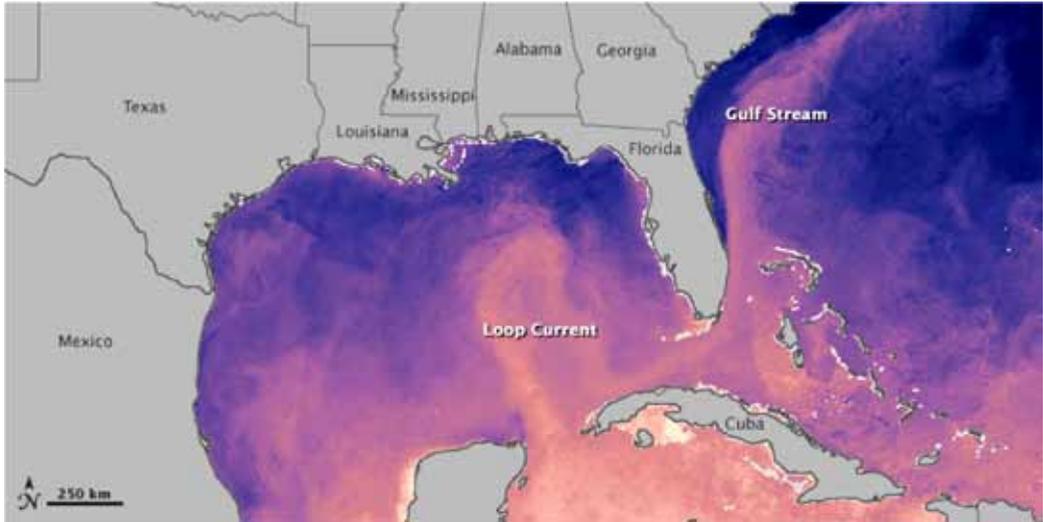


Рис. 8.23. Температура поверхности Мексиканского залива и положение Loop Current по сводным данным MODIS Terra за 1–8 мая 2010 г. (©MODIS Rapid Response Team)

Следует отметить, что этот циклонический вихрь одновременно был частью другой дипольной структуры размером 350 км, расположенной южнее и направленной на восток к западному побережью Флориды (рис. 8.22б, см. с. 427). Такая комбинация двух дипольных структур с единым циклоническим или антициклоническим вихрем называется «плотной упаковкой» диполей (Лаврова, Костяной, 2010).

После 17 мая ситуации значительно обострилась, поскольку нефтяное загрязнение (в виде струи) уже достигло 27° с.ш., куда обычно доходит петля Юкатанского течения (*Loop Current* в зарубежной терминологии) — самого мощного течения в восточной части Мексиканского залива с расходом $24...30 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ и скоростями до 1 м/с. Это течение питает Флоридское течение (скорости до 2 м/с), которое огибает полуостров Флориду с юга и востока. На рис. 8.23 представлена сводная карта ТПО за 1–8 мая 2010 г., на которой петля хорошо видна по локальному максимуму ТПО. Кроме того, на рис. 8.22, 8.23 видно, что условно «южная» дипольная структура является северной оконечностью этой петли. В дальнейшем были возможны три варианта развития событий:

- «нефтяная струя» захватывается циклоническим вихрем двух диполей (на взгляд авторов, это был наиболее вероятный сценарий);
- «нефтяная струя» южным диполем выносится к западным берегам Флориды;
- «нефтяная струя» захватывается петлей мощного Юкатанского течения и выносится на юг-юго-восток.

Расчеты показывали, что в случае худшего последнего сценария, если нефтяное пятно будет захвачено самим течением, то загрязнение может достигнуть южных и восточных берегов Флориды за 7–10 дней. Однако процессу его распространения

на юго-восток (и восток), как показывали оперативные карты NOAA, мешал восточный ветер со скоростью порядка 5 м/с (рис. 8.24).

Последующие спутниковые изображения подтвердили, что худший сценарий, который активно обсуждался в СМИ американскими и европейскими специалистами в области дистанционного зондирования Земли, не реализовался, нефтяное пятно Флориды не достигло. Как и предполагали авторы, сработал первый вариант. «Нефтяная струя» сохранялась некоторое время примерно на одном месте, длина ее увеличилась до 400 км, а по характерным особенностям распределения сигнала на РЛИ от 25 мая видно, что струя «наматывалась» на циклонический вихрь (рис. 8.25, см. с. 430).

Как сообщили СМИ, 27 мая 2010 компания BP, на которую была возложена вся ответственность за одну из крупнейших в истории утечек нефти, смогла частично остановить выброс нефти, начав закачивать в скважину спецраствор. Однако на РЛИ от 28 мая прекрасно видно (рис. 8.26, см. с. 431), что, хотя «нефтяная струя» (направленная на юго-восток) практически исчезла, само пятно очень сильно увеличилось в размерах, его площадь достигла 23 тыс. км². Заметно также влияние циклонических вихрей размером 20–30 км на распространение его отдельных частей.

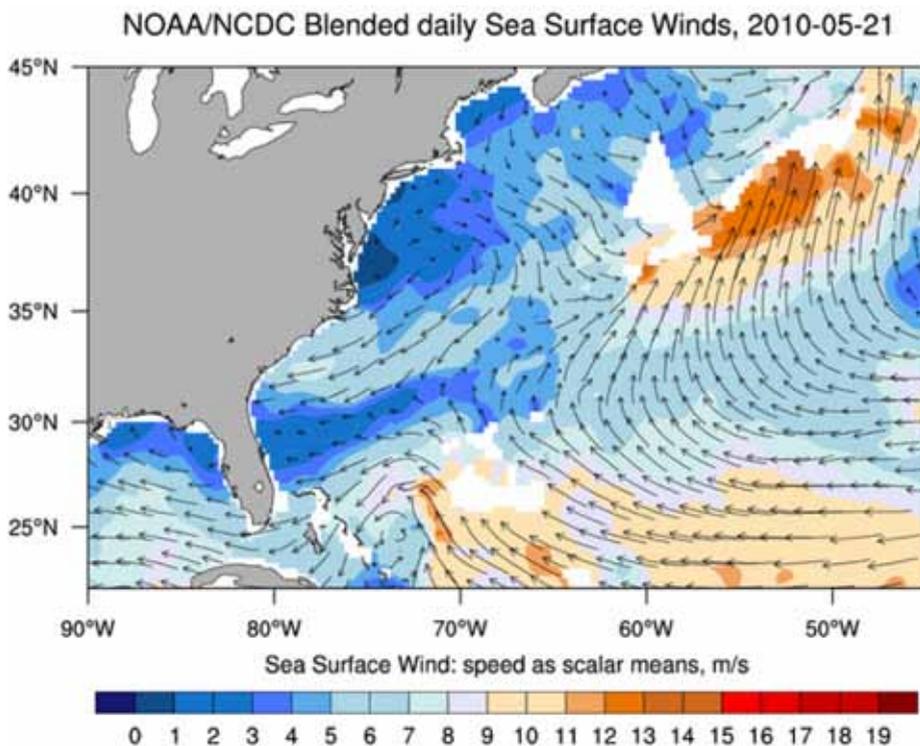


Рис. 8.24. Ветер над акваторией Атлантического океана и Мексиканского залива за 21 мая 2010 г. по данным NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/seawinds.html>)



Рис. 8.25. «Нефтяная струя»,двигающаяся в сторону Loop Current (Юкатанского течения). Фрагмент изображения ASAR Envisat (395×425 км), полученного 25 мая 2010 г. в 15:47 UTC. Звездочкой отмечено место аварии (© ESA, 2010)

Попытка зацементировать глубоководную скважину, предпринятая 28 мая компанией BP, закончилась неудачей. По сообщениям официальных источников, морскую поверхность стали активно обрабатывать с самолетов и с судов дисперсантами Corexit 9500, которые разбивают нефть на более мелкие фрагменты. Не обладая полной и правдивой информацией о применяемых методах борьбы с нефтяным загрязнением, но, основываясь на данных спутникового мониторинга, можно сделать вы-

воды, что начиная с 28 мая 2010 г., после усиленной обработки морской поверхности различного рода химикатами, образовалась тонкая нефтяная пленка, которая под действием южного ветра распространилась на север и достигла берега (рис. 8.27, см. с. 432).



Рис. 8.26. Распространение нефтяного загрязнения после попытки остановить выброс нефти из скважины. Общая площадь загрязнения превысила 23 тыс. км². Фрагмент изображения ASAR Envisat (307×335 км), полученного 28 мая 2010 г. в 15:52 UTC. Звездочкой отмечено место аварии (© ESA, 2010)



Рис. 8.27. Тонкая нефтяная пленка, образовавшаяся после обработки морской поверхности дисперсантами, достигла берегов штатов Миссисипи, Алабама и Флорида. Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 3 июня 2010 г. в 03:44 UTC. Звездочкой обозначено место аварии (© ESA, 2010)

В ночь на 12 июля 2010 г. компания ВР установила новое защитное устройство (заглушку) весом 70 т. Предыдущую заглушку, которая не справлялась с удержанием нефти, сняли 10 июля. При этом в залив могло попасть около 120 тыс. баррелей нефти. На РЛИ от 11 июля хорошо видно четко локализованное пятно вылившейся нефти, площадь которого составила более 3500 км² (рис. 8.28).



Рис. 8.28. Новое нефтяное пятно, образовавшееся после снятия временного защитного купола 10 июля 2010 г. Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 11 июля 2010 г. в 03:49 UTC. Звездочкой обозначено место аварии (© ESA, 2010)



Рис. 8.29. Отсутствие поверхностных проявлений нефтяных загрязнений в районе аварии. Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного 15 октября 2010 г. в 15:52 UTC. Звездочкой обозначено место аварии (© ESA, 2010)

Заглушка не дала возможности полностью прекратить истечение нефти. Только проведенная 4 августа 2010 г. операция под названием “static kill” (полная остановка утечки), которая заключалась в закачке в аварийную скважину специальной тяжелой буровой жидкости, а затем цемента, позволила президенту США Бараку Обаме заявить, что «...битва за остановку утечки нефти в Мексиканский залив практически завершена».

Нефтяное загрязнение практически полностью исчезло с морской поверхности через нескольких недель. На РЛИ, полученных 15 октября 2010 г., кроме небольших пятен вблизи дельты Миссисипи, загрязнений на морской поверхности не наблюдается (рис. 8.29, см. с. 434).

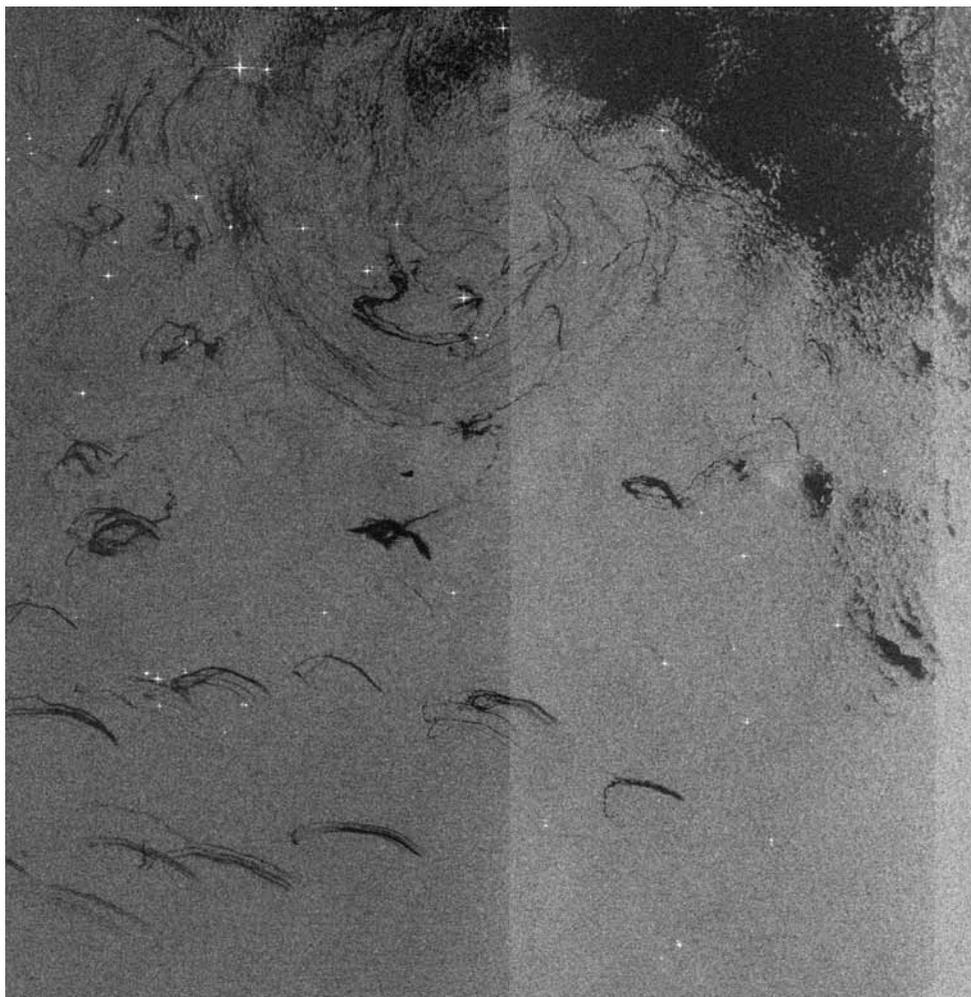


Рис. 8.30а. Проявление естественных нефтяных загрязнений в Мексиканском заливе (грифоны). Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного с разрешением в точке 75 м 16 июня 2010 г. в 15:55 UTC (© ESA, 2010)



Рис. 8.306. Проявление естественных нефтяных загрязнений в Мексиканском заливе (грифоны). Фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного с разрешением в точке 75 м 24 июля 2010 г. в 16:01 UTC (© ESA, 2010)

Океан в очередной раз справился с задачей самоочищения. Неизвестной остается судьба «нефтяного облака»: возможно, в будущем может развиваться вторичное загрязнение. Хотя наиболее вероятно, что вся нефть осядет на дно. Однако вряд ли это приведет к тяжелым последствиям. Даже при том, что в Мексиканском заливе и так в результате грифонной активности в море выбрасываются сотни тысяч тонн нефти в год (рис. 8.30, см. с. 435, 436).

В заключение хочется отметить ряд важных выводов и «уроков», связанных с оперативным мониторингом катастрофического разлива нефти в Мексиканском заливе:

- очень важно иметь разностороннюю спутниковую информацию, которая становится доступной, если страна подписывает хартию «Космос и крупные бедствия»;
- совместный анализ радиолокационных и оптических изображений оказался очень эффективным, так как оптические изображения, которые были получены в условиях солнечного блика, дали возможность исключить из рассмотрения области ветрового затишья на РЛИ, а РЛИ дали более полную информацию о размерах областей, покрытых пленками нефти, не различимых в оптическом диапазоне. К тому же в июне-июле 2010 г. сплошная облачность, связанная с прохождением многочисленных тропических циклонов, не позволяла использовать оптические изображения. Возможность получения регулярных радиолокационных изображений обеспечила постоянный мониторинг загрязнения морской поверхности и береговой черты в Мексиканском заливе;
- при составлении прогноза распространения нефтяного пятна очень важно учитывать не только ветер, волнение и постоянные течения, но и фактическую мезомасштабную циркуляцию вод, которая, как показала ситуация в Мексиканском заливе, оказывает огромное влияние на перенос загрязнений. Практически все ежедневные прогнозы, которые выставлялись на сайте <http://gohsep.la.gov/oilspill.aspx>, не подтверждались, потому что они не учитывали сложную вихревую динамику вод в данном районе.

Фрагменты всех имеющихся в распоряжении специалистов ИКИ РАН спутниковых изображений представлены на сайте, созданном в лаборатории аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_mex.html.

Авторы выражают благодарность компании MODIS Rapid Response Team (NASA, США) за возможность оперативного использования исходной и обработанной спутниковой информации со сканеров MODIS, установленных на спутниках Aqua и Terra, а также Национальному центру климатических данных NOAA (США) за предоставление оперативных данных о поле температуры поверхности океана и ветре. Радиолокационные данные ASAR Envisat получены в рамках проекта ESA C1P6342.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировая практика показывает, что наиболее эффективным средством мониторинга экологического состояния морей и океанов, техногенных и природных катастроф, морских транспортных и трубопроводных систем, освоения нефтегазовых и рыбных ресурсов океана являются спутниковые системы дистанционного зондирования Земли. Такие комплексные и многоцелевые системы, которые успешно используются разными национальными и международными организациями, министерствами и ведомствами, государственными и частными компаниями, существуют в США, Канаде, Европе, Индии и Японии. Космическая группировка этих систем постоянно обновляется, на смену приходят спутники и приборы, более точные по своим характеристикам и с новыми возможностями дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В Российской Федерации такой системы нет из-за отсутствия отечественных природоресурсных спутников с необходимым набором сенсоров. Планы восстановления и развития спутникового ДЗЗ в России существуют, но сроки их выполнения постоянно переносятся. Постановлением Правительства РФ от 22 октября 2005 года № 635 утверждена «Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы», которая декларирует, что первым приоритетным направлением космической деятельности России, способствующим достижению стратегических целей, считается *«мониторинг окружающей среды и околоземного пространства, контроль чрезвычайных ситуаций и экологических бедствий, исследование природных ресурсов Земли»*. В Постановлении четко записано: *«Для контроля чрезвычайных ситуаций и решения наиболее оперативных природоресурсных задач необходимо обеспечить к 2010 году наблюдение земной поверхности с суммарной площадью 20–30 миллионов квадратных километров (территории России и прилегающих зон экономических интересов). При этом отдельные регионы должны наблюдаться с периодичностью от трех часов до одних суток и разрешением до 1–5 метров. С учетом коммерческих и экономических интересов Российской Федерации к 2015 году общая площадь наблюдаемой территории возрастет до 50–70 миллионов квадратных километров с разрешением 1–5 метров и периодичностью по отдельным районам от реального масштаба времени до 1 суток. Особую важность приобретет задача прогноза техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Космическими средствами должно быть обеспечено осуществление постоянного экологического мониторинга территории Российской Федерации, а также контроля за состоянием особо важных объектов»*.

Постановление отмечает: *«Основой космической деятельности являются российские космические средства, создание и развитие которых ускоряет процесс становления экономики, обеспечивает эффективное развитие науки, техники и социальной сферы, укрепляет оборонную мощь страны. Если государственные потребности в космических средствах и услугах не будут обеспечены путем создания и развития российских кос-*

мических средств, они будут удовлетворяться приобретением услуг на мировом рынке, что потребует больших экономических затрат, значительно уменьшит возможности для инновационного пути развития отечественной экономики, увеличит разрыв между Российской Федерацией и наиболее развитыми странами мира в постиндустриальном обществе».

К сожалению, следует констатировать, что комплексная система спутникового мониторинга территории и акватории России не создана, а российские ученые и специалисты по-прежнему пользуются данными и информацией с зарубежных спутников. Это подтверждает и собственный 30-летний опыт работы авторов данной книги в области ДЗЗ. Что касается спутникового мониторинга морей России, то необходимо признать, что отдельными государственными и частными организациями (МПП, МЧС, Росгидромет, РАН, Росрыболовство, Газпром, Лукойл и рядом других) на протяжении многих лет ведутся попытки создания различных систем спутникового мониторинга, которые разрознены по целям, задачам, акваториям, используемым спутникам и приборам, применяемым методикам получения, обработки и анализа данных, исследуемым параметрам. В результате работающие системы существенным образом отличаются по качеству, оперативности, структуре и функциональным характеристикам.

В начале 2000-х годов авторы, сотрудники Института космических исследований РАН, Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и Геофизического центра РАН, совместно со специалистами по ДЗЗ Морского гидрофизического института НАНУ (г. Севастополь, Украина) объединили свои усилия для решения различных научных и практических задач в области ДЗЗ. За это время совместно было выполнено несколько десятков национальных и международных научных и коммерческих проектов, связанных с исследованием океанов и морей. В данной книге изложен практический опыт авторов по проведению комплексного спутникового мониторинга только четырех морей России – Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского. Это связано с тем, что этими морями авторы занимались больше и дольше всего. При этом был получен ряд важных результатов как в научном плане, так и в организации и проведении мониторинга.

Так, в июне 2004 года по просьбе ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» нами был разработан и организован оперативный комплексный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики в качестве важного компонента контроля экологического состояния окружающей среды в районе нефтедобывающей платформы Д-6. В России такая комплексная система спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской акватории ранее не существовала. Поскольку мониторинг осуществлялся 24 часа в сутки, 7 дней в неделю в течение 18 месяцев (2004–2005), то можно считать, что нами впервые в России была создана служба комплексного мониторинга экологического состояния Балтийского моря, работающая в оперативном режиме. Полных аналогов такой системы в мировой практике на тот момент не существовало, а имевшиеся подобию не обладали широким комплексным, мультисенсорным и мультиплатформным подходом к решению поставленных задач и поэтому имели ряд известных недостатков. До сих пор в России никем больше не создана такая служба, которая могла бы сравниться с реализованной на Балтике: по объему и спектру получаемой, обрабатываемой и анализируемой спутниковой, океанографической и метеорологической информации; оперативности и надежности функционирования

системы; степени ее эффективности; уровню квалификации основных исполнителей. Эта система и сегодня может служить основой для создания комплексной системы оперативного спутникового мониторинга морей России.

В книге не приведены примеры организации и проведения комплексного исследования отдельных районов Черного и Балтийского морей, в частности, строительства морских газопроводов «Джубга-Лазаревское-Сочи» в 2010 году и «Норд Стрим» в 2010–2011 годах. Это связано с ограничениями на публикацию материалов, накладываемые подписанными контрактами.

Не вошли и другие моря, например, Аральское, комплексный мониторинг которого проводится уже более 10 лет, но оно не относится к морям России. Или Белое, Баренцево и Японское моря, по которым нами велись отдельные работы в области ДЗЗ, но комплексный спутниковый мониторинг не проводился.

Комплексный спутниковый мониторинг всех морей России мог бы внести важный вклад в охрану окружающей среды, чему в настоящее время уделяется явно недостаточное внимание. Об этом шла речь 27 мая 2010 года на заседании президиума Государственного совета, посвященного совершенствованию госрегулирования в сфере охраны окружающей среды. На этом заседании Президент РФ Дмитрий Медведев заявил, что в сфере охраны окружающей среды в стране накопилось значительное количество проблем и разрозненными действиями решить их не получится, экологические проблемы в России должны решаться на основе единой государственной политики.

Спустя год на заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России 27 июня 2011 года, на котором обсуждались экологические аспекты модернизации экономики, Дмитрий Медведев назвал несколько перспективных проектов, на которых надо сосредоточить внимание в ближайшее время. Первый — создание системы мониторинга экологической обстановки из космоса. Он заявил: *«Не так давно, 9 июня, в Дзержинске на президиуме Госсовета мы обсуждали накопленные экологические проблемы, говорили о том, что ими нужно заниматься постоянно и системно. По итогам этого заседания мною были даны поручения, часть из них уже исполняется: принят в первом чтении законопроект о создании системы экологического мониторинга, в Государственную Думу внесён законопроект о защите морей от нефтяных загрязнений. Законодательные работы должны быть доведены до конца, их нужно завершить оперативно и в полном объёме... Благодаря работе спутников сейчас возможно не только оперативное получение такой информации, но и контроль за передвижением экологически опасных грузов, за состоянием лесов, что особенно важно в летний период, в частности, за состоянием ледников, за работой атомных станций. Однако эксплуатация космических систем требует довольно значительных затрат. ...Поэтому нужно создать правовые и организационные условия для того, чтобы привлечь в эту сферу не только государственные инвестиции, чем мы занимались все последние годы, но и постараться превратить эту сферу в сферу частно-государственного партнёрства (включая вопросы ведения экологического мониторинга)».*

Такое пристальное внимание к проблемам экологии в России и необходимости создания спутниковой системы экологического мониторинга подтверждает актуальность рассматриваемых в книге задач и важность полученных результатов.

Осуществление промышленной добычи углеводородного сырья на континентальном шельфе России создает риск нарушения экологического равновесия мор-

ской и геологической сред в районах проведения работ и на путях транспортировки нефтепродуктов. Необходимо создание системы государственного мониторинга шельфовой зоны России и технологии работ при аварийных разливах нефти с учетом международных обязательств России. При этом реализация контрольных возможностей уполномоченных государственных органов в значительной степени зависит от своевременного и качественного информационного обеспечения этих органов данными о фактических и ожидаемых гидрометеорологических условиях и опасных гидрометеорологических явлениях (включая опасные и особо опасные), а также о загрязнении морской и геологической сред континентального шельфа и прибрежных районов [Стратегия изучения и освоения нефтегазового потенциала континентального шельфа Российской Федерации на период до 2020 года].

В России надзор за состоянием водных ресурсов осуществляет Министерство природных ресурсов и экологии. В настоящее время в рамках государственного мониторинга не проводится никаких мероприятий по оперативному обнаружению и ликвидации нефтяных разливов не катастрофических масштабов, хотя хорошо известно, что именно «фоновое» загрязнение наносит сегодня наибольший вред состоянию морской среды из-за его регулярности.

События в Мексиканском заливе (катастрофический разлив нефти) в апреле-июне 2010 г. показали, насколько важно иметь оперативную комплексную систему мониторинга нефтяного загрязнения, базирующуюся, прежде всего, на комплексных спутниковых наблюдениях. В настоящее время Россия не готова не только к угрозам таких масштабных загрязнений, но и к существующему ежедневному «хроническому загрязнению» морских вод (за счет промывки танков и машинных отделений, слива льяльных вод и различного рода утечек нефтепродуктов), которое по статистике в три раза превышает объем загрязнений в результате аварий танкеров. Масштабы «хронического загрязнения» морей России также неизвестны. Для решения этой задачи предлагается использовать комплексный спутниковый мониторинг, который уже давно активно используется за рубежом и показал свою эффективность в Балтийском, Черном, Азовском и Каспийском морях.

Некоторые шаги в этом направлении уже сделаны. В 2009–2010 годах в рамках ФЦП «Мировой океан» для Министерства экономического развития Российской Федерации авторами был выполнен проект «Обоснование требований к составу, структуре и параметрам функционирования комплексной системы мониторинга районов разработки и транспортировки углеводородных ресурсов на шельфе и их пилотная апробация для Балтийского моря (оценка текущего состояния морской среды российской части моря и потенциальных рисков загрязнения, включая нефтяное загрязнение побережья)». В результате были подготовлены материалы, обосновывающие необходимость проведения комплексного экологического мониторинга морей России в районах разработки и транспортировки углеводородных ресурсов с обязательным включением спутникового компонента. Выполнены оценки потенциальных рисков загрязнения окружающей среды Балтийского моря (включая береговую линию и зоны с особыми режимами природопользования) в результате строительства и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса российскими компаниями. Разработаны и изложены общие принципы построения комплексной системы регионально-адаптированного мониторинга морей России в районах разработки и транспортировки углеводородных ресурсов. Подготовлены предложения по составу,

структуре и параметрам функционирования комплексной системы мониторинга, выбору спутников, сенсоров и параметров среды, получаемых на основе спутниковой информации и необходимых для контроля состояния водной поверхности. Даны рекомендации по проведению комплексного экологического мониторинга морей России в районах добычи и транспортировки углеводородных ресурсов и обоснование затрат на его проведение.

Организация комплексного спутникового мониторинга морей России будет иметь важное практическое значение для рационального и экологически чистого природопользования в ходе реализации экономических проектов нефтегазовой отрасли в прибрежно-шельфовых зонах морей России. Область применения результатов мониторинга будет включать: проектирование, строительство, эксплуатацию и мониторинг промышленных гидротехнических объектов на акватории и берегах морей России, прогноз эволюции экосистемы морей, рыболовство, оценку регионального изменения климата, информационное обеспечение экологической безопасности хозяйственной деятельности в морях России.

Есть основания полагать, что эта книга в ближайшем будущем станет «предисловием» к созданию «Национальной системы спутникового мониторинга морей России».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГВВ	атмосферные гравитационные внутренние волны
ВВ	внутренние волны
ВМС	военно-морские силы
ВМП	высота морской поверхности
ГЕОИК	ГЕО Интеркосмос — серия российских геодезических спутников, осуществляющих альтиметрические измерения для создания единой геодезической системы координат повышенной точности, уточнения формы Земли и её гравитационного поля
ГОИН	Государственный океанографический институт Роскомгидромета
ГЦ РАН	Геофизический центр РАН
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЕКА	Европейское космическое агентство
ИК	инфракрасный
ИКИ РАН	Институт космических исследований РАН
ИО РАН	Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	космический аппарат
КМСС	комплекс многозональной спутниковой съемки
МГИ	Морской гидрофизический институт
МСУ-МР	многозональное сканирующее устройство малого разрешения
МЧС	Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
НАНА	Национальная академия наук Азербайджана
НАНУ	Национальная академия наук Украины
НАСА	Национальный комитет по аэронавтике и исследованию космического пространства (США)
НИЦ	Научно-исследовательский центр
НОАА	Национальная администрация по исследованию океана и атмосферы (США)
НПЦ	Научно-производственный центр
ОВВ	океанические внутренние волны
ОЧТ	Основное черноморское течение
ПАВ	поверхностно-активные вещества; прибрежные антициклонические вихри
ППВВ	поверхностные проявления внутренних волн
РАН	Российская академия наук

РЛ	радиолокационный
РЛИ	радиолокационное изображение
РЛС	радиолокационная станция
РЛСБО	радиолокационная станция бокового обзора
РСА	радиолокатор с синтезированной апертурой
РФ	Российская Федерация
РФФИ	Российский фонд фундаментальных исследований
СВДЗК	современные вертикальные движения земной коры
СВМП	средняя высота морской поверхности
СЗЧМ	северо-западная часть Черного моря
СВЧ	сверхвысокие частоты
СЦ ГМС ЧАМ	Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей
ТПВ	приповерхностная температура воздуха
ТПМ	температура поверхности моря
ТПО	температура поверхности океана
УФ	ультрафиолетовый
ФЦП	Федеральная целевая программа
ХЕЛКОМ	Хельсинкская комиссия
ХПС	холодный промежуточный слой
ЮО ИО РАН	Южное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН
ADEOS	Advanced Earth Observing Satellite (усовершенствованный спутник наблюдения Земли)
AIS	Automatic Identification System (Система автоматической идентификации судов)
AMI	Active Microwave Instrument (активный микроволновый сенсор)
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой)
ASCAT	Advanced SCATterometer (усовершенствованный скаттерометр)
ATSR	Along-Track Scanning Radiometer (сканирующий вдоль трека пассивный радиометр ИК- и СВЧ диапазонов)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения)
AVISO	Archivage, Validation et Interpretation des donnees des Satellites Oceanographiques (Центр по хранению, верификации и интерпретации спутниковых океанографических данных, Франция)
BP	British Petroleum (нефтедобывающая компания)
BSH	Bundesamt fur Seeschifffahrt und Hydrographie (Федеральное агентство по судоходству и гидрографии Германии)
CLASS	Comprehensive Large Array-data Stewardship System (Комплексная управляющая система для работы с большими массивами данных)
CryoSat	Cryosphere Satellite (спутник по изучению криосферы)
CSA	Canadian Space Agency (Канадское космическое агентство)
DAAC	Distributed Active Archive Centre (Распределенный активный центр архивной информации)

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (German Aerospace Center, Немецкое космическое агентство)
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (Система доплеровского слежения)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, Великобритания)
ENVI	ENvironment for Visualizing Images (Система визуализации изображений окружающей среды компании ITT Visual Information Solutions)
Envisat	ENVironment SATellite (спутник по исследованию окружающей среды)
ERS 1/2	European Remote Sensing Satellite (серия европейских спутников дистанционного зондирования), спутники ERS-1 и ERS-2
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство)
EUMETSAT	The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (Европейская организация по использованию метеорологических спутников)
FNMOС	The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, USA (Метеорологический и океанографический вычислительный центр ВМС США)
GDR	Geophysical Data Records (окончательные данные спутниковой альтиметрии)
GEOS	Geodynamics Experimental Ocean Satellite (серия американских спутников эксперимента по исследованию геодинамики океана)
GEOSAT	GEOdetic SATellite (геодезический спутник ВМС США)
GFO	GEOSAT Follow On (серия спутников ВМС США, продолжающих программу спутника GEOSAT)
GMT	Greenwich Mean Time (среднее время по Гринвичу)
GPS	Global Positioning System (глобальная система позиционирования)
GSFC	Goddard Space Flight Center (Годдардский центр космических полетов)
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model (модель высокого разрешения по ограниченному пространству)
HIROMB	High Resolution Operational Model for the Baltic Sea (оперативная модель высокого разрешения для Балтийского моря)
ICESat	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (спутник, предназначенный для исследования ледяного покрова, облачности и рельефа суши)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров по электротехнике и электронике)
IGDR	Interim Data Records (промежуточные данные спутниковой альтиметрии)
IMM	Image Mode medium resolution (данные, получаемые в узкой полосе обзора со средним разрешением в точке 75 м)
INTAS	International Association for the promotion of co-operation with scientists from the New Independent States of the former Soviet Union (Международная ассоциация для развития сотрудничества с учеными из новых независимых стран бывшего Советского Союза)

ITOPF	The International Tanker Owners Pollution Federation Limited
ITU	International Telecommunication Union (Международный союз электросвязи)
J 1/2	спутники Jason-1 и Jason-2
JPL	Jet Propulsion Laboratory (Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института)
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Королевский метеорологический институт Нидерландов)
KSAT	Kongsberg Satellite Services (Конгсбергские спутниковые службы, Тромсе, Норвегия)
LAADS	Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (Система распространения данных о суше и атмосфере)
MCSST	Multi-Channel Sea Surface Temperature (температура поверхности моря, рассчитанная по многоканальным данным)
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer (спектрометр среднего разрешения)
MetOp	Meteorological Operational (метеорологический оперативный спутник)
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)
MOPED	Международный проект Monitoring of Oil Pollution using Earth Observation Data: a multi-sensor, multi-platform approach
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (Национальные центры прогнозов окружающей среды США)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальный комитет по исследованию океана и атмосферы США)
NRA	NASA Radar Altimeter (радар-альтиметр NASA)
NSCAT	NASA Scatterometer (скаттерометр Национального комитета по аэронавтике и исследованию космического пространства, США)
OGDR	Operational Geophysical Data Records (оперативные данные спутниковой альтиметрии)
PODAAC	Архивный центр по данным физической океанографии Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института
QuikSCAT	Quick SCATterometer (спутник с быстрым скаттерометром на борту)
RA	Radar Altimeter (радар-альтиметр)
RADSCAT	RADar SCATterometer (радар-скаттерометр)
SAR	Synthetic Aperture Radar (радиолокатор с синтезированной апертурой)
SASS	Seasat-A Satellite Scatterometer (скаттерометр спутника Seasat-A)
SEASAT	SEAfaring SATellite (спутник для обеспечения мореплавания)
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (широкополосный датчик обзора морской поверхности)

SIR-C/X-SAR	Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar (радиолокатор с синтезированной апертурой космического бортового базирования, работающий в диапазоне L, C и X)
Skylab	Sky Laboratory (серия орбитальных станций «Небесная лаборатория»)
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Шведский институт метеорологии и гидрологии)
SSMI	Special Sensor Microwave Imager (специальный датчик микроволнового изображения)
SST	Sea Surface Temperature (температура поверхности моря)
T/P	спутник TOPEX/Poseidon
TOPEX	TOPOgraphy EXperiment (Эксперимент по исследованию мезомасштабной изменчивости топографии морской поверхности)
USGS	United States Geological Survey (Геологическая служба США)
UT/CSR	University of Texas, Center for Space Research, USA, Austin (Центр космических исследований Техасского Университета)
UTC	Universal Time Coordinated (всемирное координированное время)
WSM	Wide Swath Mode (широкая полоса обзора)

ЛИТЕРАТУРА

- Абушенко Н. А., Барталев С. А., Беляев А. И., Ершов В. В., Коровин Г. Н., Кошелев В. В., Лупян Е. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Минько Н. П., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В. (2000)* Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России // *Научные технологии*. 2000. Т. 1. № 2. С. 4–18.
- Авилов В. И., Авилова С. Л. (2001)* Проявление флюидных потоков со дна в глубоководной части Черного моря // *Докл. АН*. 2001. Т. 378. № 4. С. 522–525.
- Авилов В. И., Авилова С. Д. (2007)* Оценка генезиса углеводородов подводных вулканов, газогидратов, газовых факелов Черного моря по газобиогеохимическим показателям // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2007. № 2. С. 67–85.
- Альперт Я. Л. (1972)* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 559 с.
- Архипкин В. С. (1990)* Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море // *Каспийское море. Структура и динамика вод*. М.: Наука, 1990. С. 61–74.
- Архипкин В. С., Бондаренко А. Л., Ведев Д. Л., Косарев А. Н. (1992)* Особенности циркуляции вод у восточного берега Среднего Каспия // *Водные ресурсы*. 1992. № 6. С. 36–43.
- Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Макриденко Л. А. и др. (2005)* Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации // *Сб. тр. НИЦ «Планета»*. 2005. № 1 (46). С. 3–21.
- Бабий М. В., Букатов А. Е., Станичный С. В. (2005)* Атлас температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986–2002 гг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. 265 с.
- Багрова Л. А., Боков В. А., Багров Н. В. (2001)* География Крыма. Киев: Лыбидь, 2001. 304 с.
- Басович А. Я., Баханов В. В., Таланов В. И. (1982)* Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // *Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность* / Ред. Е. Н. Пелиновский. Горький: ИПФ, 1982. С. 8–30.
- Басович А. Я., Таланов В. И. (1977)* О трансформации коротких поверхностных волн на неоднородных течениях // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13. № 7. С. 766–773.
- Басс Ф. Г., Фукс И. М. (1972)* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- Баханов В. В., Таланов В. И. (1999)* Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // *Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. тр.* / Ред. В. И. Таланов, Е. Н. Пелиновский. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 1. С. 81–106.
- Бедрицкий А. И., Асмус В. В., Кровотыцнев В. А., Лаврова О. Ю., Островский А. Г. (2007)* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 11. С. 5–13.

- Бедрицкий А. И., Асмус В. В., Кровотынцев В. А., Лаврова О. Ю., Островский А. Г. (2009)* Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 3. С. 5–19.
- Белокопытов В. Н. (2010)* Межгодовая изменчивость обновления вод холодного промежуточного слоя Черного моря в последние десятилетия // *Морской гидрофиз. ж.* 2010. № 5. С. 33–41.
- Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. (1984)* Изменчивость гидрофизических полей в Черном море. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
- Блатов А. С., Ведев Д. Л., Косарев А. Н. (1990)* О сейшах в Каспийском море // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 8. С. 109–114.
- Бондур В. Г. (2004)* Аэрокосмические методы в современной океанологии // *Новые идеи в океанологии*. М.: Наука, 2004. С. 55–117.
- Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В. (2001)* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // *Исслед. Земли из космоса*. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Ежова Е. В., Казаков В. И., Сергеев Д. А., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. (2010)* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Ч. 3. Поверхностные проявления внутренних волн // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. № 4. С. 1–10.
- Бочарова Т., Vyfield V., Gade M., da Silva J., Ермаков С., Костяной А., Лаврова О., Мамедов Р., Станичный С. (2008)* Международный проект MOPED: «Мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности: синтез разнородных данных многих сенсоров и спутников» // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 33–41.
- Бочков А. П., Иванова И. Б. (1972)* Приток поверхностных вод в Азовское море и его возможные изменения // *Тр. ГГИ*. 1972. Вып. 200. С. 149–185.
- Браво-Животновский Д. М., Долин Л. С., Ермаков С. А., Зуйкрва Э. М., Лучинин А. Г., Титов В. И. (1984)* Эффект усиления дециметровых ветровых волн в зоне нефтяного слика // *Докл. АН СССР*. 1984. Т. 276. № 5. С. 1243–1246.
- Булатов М. Г., Кравицов Ю. А., Лаврова О. Ю., Литовченко К. Ц., Митягина М. И., Раев М. Д., Сабинин К. Д., Трохимовский Ю. Г., Чурюмов А. Н., Шуган И. В. (2003а)* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // *Успехи физ. наук*. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
- Булатов М. Г., Кравицов Ю. А., Кузьмин А. В., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Раев М. Д., Скворцов Е. И. (2003б)* Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999–2002). М.: КДУ, 2003. 143 с.
- Булгаков Н. П., Юркова И. Ю. (1998)* Современное состояние изученности влияния речного стока на гидрологическую структуру Черного моря // *Морской гидрофиз. ж.* 1998. № 6. С. 48–59.
- Бурцев М. А., Воронин А. А., Еремеев В. В., Злобин В. К., Кузнецов А. Е., Лупян Е. А., Милехин О. Е., Соловьев В. И. (2009)* Комплекс оперативной обработки гидрометеорологической спутниковой информации // *Исслед. Земли из космоса*, 2009. № 1. С. 16–23.
- Ведерников В. И., Демидов А. Б. (2002)* Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // *Комплексные исслед. северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
- Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. (2010)* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
- Востоков С. В., Ушицев В. Б., Лисицын Б. Е., Соловьев Д. М. (2002)* Состояние популяции гребневика *Mnemiopsis leidyi* в Каспийском море // *Каспийский плавучий ун-т. Науч. бюл.* 2002. № 3. С. 127–138.
- Власенко В. И., Иванов В. А., Красин И. Г., Лисиченок А. Д. (1997)* Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн в шельфовой зоне Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // *Морской гидрофиз. ж.* 1997. № 3. С. 3–16.

- Гаргона Ю. М. (2001)* Закономерности многолетней динамики океанографических процессов и компонентов биоты Азовского моря // *Среда, биота и моделирование экологич. процессов в Азовском море*. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 44–71.
- Георгиевский В. Ю. (1982)* Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений // *Тр. Ленинградского гидрометеорологич. ин-та*. 1982. Вып. 79. С. 129–136.
- Герман В. Х., Левиков С. П. (1988)* Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 232 с.
- Гидродинамика океана. Физика океана Т. 2 / Под ред. Монина А. С. М.: Наука, 1978. 455 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия (1991а) / Под ред. Симонова А. И., Альтмана Э. Н. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 429 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. 5. Азовское море (1991б) / Под ред. Гоптарева Н. П., Симонова А. И., Затучной Б. М. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 237 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Проект «Моря». Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия (1992) / Под ред. Терзиева Ф. С., Косарева А. Н., Керимова А. А. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
- Гинзбург В. Л. (1967)* Распространение электромагнитных волн в плазме. М. Наука, 1967. 683 с.
- Гинзбург А. И. (1992)* Нестационарные вихревые движения в океане // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 6. С. 997–1004.
- Гинзбург А. И. (1994)* Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря // *Исслед. Земли из космоса*. 1994. № 2. С. 75–83.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Станичный С. В. (1998)* Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // *Исслед. Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 83–88.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. (2003)* Мезомасштабная изменчивость Черного моря по данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // *Исслед. Земли из космоса*. 2003. № 3. С. 34–46.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Шеремет Н. А. (2005)* Структура апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия (по спутниковым наблюдениям) // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 76–85.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Шеремет Н. А. (2006)* Фронтальная зона апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря (спутниковые наблюдения) // *Исслед. Земли из космоса*. 2006. № 4. С. 3–12.
- Гинзбург А. И., Зацепин А. Г., Кременецкий В. В., Пиотух В. Б. (2008а)* Мезомасштабная динамика вод Черного моря // *Океанология на старте XXI века*. М.: Наука, 2008. С. 10–30.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. (2008б)* Долговременная изменчивость температуры поверхности Черного моря и ее отклик на глобальные атмосферные воздействия // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. Вып. 5. 2008. Т. 2. С. 76–83.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Лебедев С. А. (2009)* Изменчивость температуры поверхности и уровня Черного, Мраморного и Эгейского морей по спутниковым измерениям // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. Вып. 6. 2009. Т. 1. С. 349–359.
- Голицын Г. С. (2010)* Спирали на поверхности океана — микрокопии ураганов в атмосфере // *Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*: Тез. М.: ИКИ РАН. 2010. С. 226.
- Горшков К. А., Долина И. С., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. (2003)* Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2003. Т. 39. № 5. С. 661–672.
- Горячкин Ю. Н. (2008)* Современные вертикальные движения земной коры на побережье Черного моря // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2008. № 3. С. 85–89.

- Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. (2006) Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 210 с.
- Дашкевич Л. В. (2008) Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2008. 25 с.
- Джаошвили Ш. В. (2003) Реки Черного моря. Тбилиси, 2003. 186 с. (Текст на рус. и англ. яз.).
- Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы (1987) / Ред. В. А. Урденко, Г. Циммерман. Т. 2. Ч. 2. М., Берлин, Севастополь: Изд-во Ин-та космич. исслед. АН ГДР. 1987. 197 с.
- Добровольский А. Д., Залогин Б. С. (1982) Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
- Доценко С. Ф. (1996) Генерация бароклинных волновых следов перемещающимися атмосферными фронтами // Морской гидрофиз. ж. 1996. № 6. С. 3–14.
- Доценко С. Ф., Савоськин В. М. (1993) Генерация внутренних волн движущимися нестационарными возмущениями в реально стратифицированном океане // Морской гидрофиз. журн. 1993. № 5. С. 19–30.
- Дроздов В. В. (2010) Особенности многолетней динамики экосистемы Азовского моря под влиянием климатических и антропогенных факторов // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2010. № 15. С. 155–176.
- Егоров В. А., Барталев С. А., Лупян Е. А., Уваров И. А. (2006) Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2006. № 2. С. 98–109.
- Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. (2011) Метановые сипя в Черном море. Средообразующая и экологическая роль / Под ред. Г. Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 405 с.
- Ермаков С. А. (2010) Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
- Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талипова Т. Г. (1980) О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектра ветрового волнения под действием внутренних волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 11. С. 1068–1076.
- Ермаков С. А., Зуйкова Э. М., Салашин С. Г. (1987) Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных сликах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 7. С. 707–715.
- Жильцов С. С., Костяной А. Г., Зонн И. С. (2010) Ждет ли Каспий судьба Мексиканского залива // Независимая газ. 2010. 14 сент. № 196 (НГ Энергия № 8). С. 11.
- Журбас В. М., Зацепин А. Г., Григорьева Ю. В. и др. (2004) Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
- Запелалов А. С., Пустовойтенко В. В. (2004) О точности скаттерометрического определения скорости приводного ветра // Эколог. безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч., тр. Вып. 11. НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. Севастополь, 2004. С. 262–267.
- Захаров В. С. (2006) Современные вертикальные движения земной коры // Современ. глобальные изменения природной среды. Т. 1. М.: Науч. мир, 2006. С. 626–643.
- Зацепин А. Г., Флинт М. В. (Ред.) (2002) Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002.
- Зацепин А. Г., Гинзбург А. И., Евдошенко М. А. и др. (2002) Вихревые структуры и горизонтальный обмен в Черном море // Комплексные исслед. северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 55–81.
- Ибраев Р. А. (2002) Математическое моделирование термогидродинамики Каспийского моря. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Ин-т вычисл. математики РАН. 2002. 24 с.

- Ибраев Р. А., Кирьянов С. В., Кукса В. И., Юшманов И. О. (1997)* Моделирование переноса в Каспийском море примеси, поступающей со стоком р. Волга // Метеорология и гидрология. 1997. № 8. С. 63–69.
- Ибраев Р. А., Саркисян А. С., Трухчев Д. И. (2001)* Сезонная изменчивость циркуляции вод Каспийского моря, реконструированная по среднемноголетним гидрологическим данным // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 1. С. 103–111.
- Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Затыгалова В. В. (2007)* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Иванов А. Ю., Литовченко К. Ц., Затыгалова В. В. (2008)* Аварийный разлив мазута в Керченском проливе: радиолокационный мониторинг и результаты моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 4. С. 62–76.
- Иванов В. А., Серебряный А. Н. (1982)* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
- Иванов В. А., Серебряный А. Н. (1983)* Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливно-го моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
- Иванов В. А., Серебряный А. Н. (1985)* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливно-го моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
- Иванов В. А., Коняев К. В., Серебряный А. Н. (1981)* Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 12. С. 1302–1309.
- Иванов В. А., Лисиценок А. Д., Немировский А. С. (1985)* Возбуждение короткопериодных внутренних волн пульсациями ветра // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
- Иванов М. К., Конохов А. И., Кульницкий Л. М. и др. (1989)* Грязевые вулканы в глубоководной части Чёрного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1989. № 3. С. 48–54.
- Израэль Ю. А. (1979)* Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 375 с.
- Израэль Ю. А., Цыбань А. В. (2009)* Антропогенная экология океана. М.: Флинта : Наука, 2009. 529 с.
- Каневский М. В. (2004)* Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2004. 124 с.
- Караев В. Ю., Каневский М. Б., Баландина Г. Н., Мешков Е. М., Челленор П., Срокез М., Гомменджинджер К. (2004)* Новые средства дистанционной диагностики поверхности Мирового океана: радиолокатор СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 41–52.
- Караев В. Ю., Каневский М. Б., Мешков Е. М. (2010)* Концепция космического радиолокатора СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 249–256.
- Каримова С. С., Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М. (2011)* Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5.
- Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М. 1:10 000 000. М.: ГУГК при СМ СССР, 1971. 18 с.
- Каспийское море. Гидрология и гидрохимия (1986) / Под ред. С. С. Байдина, А. Н. Косарева. М.: Наука, 1986. 262 с.
- Каталог наблюдений над уровнем на Черном и Азовском морях (1990). Севастополь: Гос. комитет СССР по гидрометеорологии. Гос. океаногр. ин-т. Севастопольское отд-ние. 1990. 268 с.

- Катунин Д. Н., Егоров С. Н., Хрипунов И. А.* и др. (2003) Основные черты гидролого-гидрохимического режима Каспийского моря в 2002 г. Рыбохозяйственные исслед. на Каспии. Результаты НИР за 2002 г. Астрахань: ФГУП «КаспНИРХ», 2003. С. 14–36.
- Катунин Д. Н., Сапожников В. В.* (1997) Комплексные исследования экосистемы Южного Каспия // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 1. С. 103–111.
- Комплексные экосистемные исследования Азовского моря в зимний период (окончание — декабрь 2009 г.). (2010). [Электрон. данные]. Режим доступа: http://ssc-ras.ru/ras/files/msword/64gov_ledokol_unesco.doc.
- Коновалова И. З., Лагутин Б. Л.* (1968) Некоторые статистические характеристики прибрежных течений по результатам аэрофотосъемки // *Тр. ГОИН*. 1968. Вып. 95. С. 72–84.
- Коняев К. В.* (1975) Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1975. Т. 11. № 3. С. 285–296.
- Коняев К. В., Сабинин К. Д.* (1973) Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // *Докл. АН СССР*. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.
- Коняев К. В., Сабинин К. Д.* (1992) Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 273 с.
- Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В.* (2006) Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. Т. 3. № 2. 2006. С. 99–105.
- Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Щетинский В. Е.* (2010) Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // *Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
- Коротяев Г. К., Огуз Т., Никифоров А. А.* и др. (2002) Динамика антициклонов в Черном море по данным спутниковых альтиметрических наблюдений // *Исслед. Земли из космоса*. 2002. № 6. С. 60–69.
- Коротенко К. А.* (2007) Моделирование мезомасштабной изменчивости в Адриатическом море // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 340–353.
- Косарев А. Н.* (1975) Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.
- Косарев А. Н., Костяной А. Г.* (2005) Феномен Кара-Богаз-Гола // *Земля и Вселенная*. 2005. № 1. С. 34–40.
- Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* (1995) Климатические термохалинные поля Каспийского моря / Под ред. С. Н., Дружинина, Ф. С. Терзиева. М.: ГОИН, 1995. 96 с.
- Костяной А. Г.* (2005) Комплексный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики (включая Кравцовское нефтяное месторождение) // *Лукойл. Экология: Материалы совещания*. Калининград, 6–10 июня 2005. М.: Полимедиа, 2005. С. 15–17.
- Костяной А. Г., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Литовченко К. Ц., Станичный С. В., Соловьев Д. М., Лебедев С. А., Сирота А. М.* (2005a) Оперативный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения в юго-восточной части Балтийского моря // 3-я Всерос. конф. «Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, 14–17 нояб. 2005.: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 7.
- Костяной А. Г., Лебедев С. А., Соловьев Д. М., Пичужкина О. Е.* (2005b) Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря. Отчет 2004. ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть». Калининград, 2005. 36 с.
- Костяной А. Г., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Литовченко К. Ц., Станичный С. В., Соловьев Д. М., Лебедев С. А., Сирота А. М.* (2006) Оперативный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений юго-восточной части Балтийского моря // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 22–31.
- Костяной А. Г., Терзиев Ф. С., Гинзбург А. И., Заклинский Г. В., Филиппов Ю. Г., Лебедев С. А., Нелзин Н. П., Шеремет Н. А.* (2008) Южные моря // *Оценочный доклад об изменениях климата*

- и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: ГУ «НИЦ Планета», 2008. С. 149–167.
- Костяной А. Г., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2009)* Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / Ред. Ю. А. Израэля. 2009. Т. 22. С. 235–266.
- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2010а)* Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
- Костяной А. Г. и др. (2010б)* Отчет о НИР «Обоснование требований к составу, структуре и параметрам функционирования комплексной системы мониторинга районов разработки и транспортировки углеводородных ресурсов на шельфе и их пилотная апробация для Балтийского моря (оценка текущего состояния морской среды российской части моря и потенциальных рисков загрязнения, включая нефтяное загрязнение побережья)» по государственному контракту с Министерством экономического развития Российской Федерации в рамках ФЦП «Мировой океан». 2010. М.: ИО РАН, 2010. 415 с.
- Костяной А. Г., Лебедев С. А., Зонн И. С., Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М. (2011)* Спутниковый мониторинг Туркменистана. М.: Сигнал, 2011. 16 с.
- Кравцов Ю. А., Кузьмин А. В., Лаврова О. Ю., Митник Л. М., Митягина М. И., Сабинин К. Д., Трохимовский Ю. Г. (1997а)* Поляризационные особенности радиолокационных изображений следов внутренних волн на поверхности океана // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 43–55.
- Кравцов Ю. А., Митягина М. И., Пунгин В. Г., Сабинин К. Д. (1997б)* Проявление тонкой структуры ветрового поля перед холодным атмосферным фронтом в радиолокационных изображениях морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 4. С. 3–12.
- Кравцов Ю. А., Митягина М. И., Чурюмов А. Н. (1999)* Рассеяние электромагнитных волн на мезомасштабных обрушающихся волнах на морской поверхности // Изв. РАН (Сер. физ.) 1999. Т. 63. № 12. С. 2403–2410.
- Кравцов Ю. А., Литовченко К. Ц., Митягина М. И., Чурюмов А. Н. (2000)* Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана // Радиотехника. 2000. № 1. С. 61–73.
- Кровотынцев В. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Островский А. Г. (2007)* Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 295–303.
- Крулякова Р. П., Крулякова М. В., Шевцова Н. Т. (2009)* Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51.
- Кронберг П. (1988)* Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 350 с.
- Кудрявцев В., Акимов Д., Йоханнесен О. (2003)* Проявление мезомасштабной изменчивости моря на радиолокационных изображениях его поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 2. С. 27–46.
- Курдюмов Д. Г., Озкой Э. (2004)* Среднемесячные характеристики внутригодовой изменчивости циркуляции вод Каспийского моря, полученные по вихререзающей термогидродинамической модели // Океанология. 2004. Т. 44. № 6. С. 843–853.
- Лавров Д. А. (2000)* Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа воды // Экологич. проблемы Каспия. РАН и Национ. акад. США: сб. докл. Международ. науч. семинара по экологич. проблемам Прикаспийского региона. 1–3 дек. 1999, Москва / Под ред. Хубларяна М. Г. М.: Киров, 2000. С. 17–21.
- Лаврова О. Ю. (2005)* Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 118–123.
- Лаврова О. Ю., Костяной А. Г. (2010)* Катастрофический разлив нефти в мексиканском заливе в апреле-мае 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 67–72.

- Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2008)* Спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений прибрежной зоны // Земля и Вселенная. 2008. № 1. С. 26–34.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г., Литовченко К. Ц. (2004)* Радиолокационный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения прибрежных зон морей России // 2-я Всерос. конф. «Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, 16–18 нояб. 2004.: Тез. докл.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г., Литовченко К. Ц. (2005)* Радиолокационный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений в прибрежной зоне российских морей // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 124–130.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Щербак С. С. (2006)* Возможности спутниковой радиолокации для решения задачи обнаружения судов // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 106–112.
- Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю., Митягина М. И., Строчков А. Я. (2009а)* Спутниковый мониторинг последствий катастрофического разлива нефтепродуктов в Керченском проливе // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 409–420.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. (2009б)* Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
- Лаврова О. Ю., Каримова С. С., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. (2010)* Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. (2011а)* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. (2011б)* Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 2. С. 40–48.
- Ле Блон П., Майсек Л. (1981)*. Волны в океане. М.: Мир, 1981. Т. 1. 480 с. Т 2. 365 с.
- Лебедев С. А. (1996)* Возможности автоматизированной реляционной геодисциплинарной оперативной системы АРГОС при работе со спутниковой информацией // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 110–115.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г. (2004)* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // Вестн. Каспия. 2004. № 3. С. 82–101.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г. (2005)* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
- Лебедев С. А., Медведев П. П. (2000)* Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии // 6-й Международ. научно-техн. конф. «Соврем. методы и средства океанолог. исслед.». 15–17 нояб. 2000, Москва: Материалы конф. М.: ИО РАН. 2000. Ч. 2. С. 52–57.
- Леонов А. И., Миропольский Ю. З. (1977)* О резонансном возбуждении внутренних гравитационных волн в океане колебаниями атмосферного давления // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 9. № 8. С. 851–862.
- Лиценберг Д. А., Сетунская Л. Е., Благоволин Н. С., Горелов С. К., Никонов А. А., Розанов Л. Л., Серебряный Л. Р., Филькин В. А. (1972)* Морфоструктурный анализ современных вертикальных движений Европейской части СССР // Геоморфология. 1972. № 1. С. 1–18.
- Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Иванов А. Ю., Юренко Ю. И. (2007)* Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 81–94.
- Лупан Е. А., Барталев С. А., Савин И. Ю. (2009)* Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмич. курьер. 2009. № 6. С. 47–49.

- Лурия Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В., Крашенинникова Ю. С. (2011а) Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
- Лурия Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е. (2011б) Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
- Мамедов Р. М. (2007) Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Баку: Элм, 2007. 432 с.
- Марчук Г. И., Саркисян А. С. (1988) Математическое моделирование циркуляции океана. М.: Наука, 1988. 304 с.
- Матвеев Л. Т. (1984) Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 750 с.
- Матишов Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М. (2008а) Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. 2008. 78 с.
- Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Бердников С. В., Сорокина В. В., Левитус С., Смоляр И. В. (2008б) Внутривековые флуктуации климата Азовского моря (по термохалинным данным за 120 лет) // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 422. № 1. С. 106–109.
- Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Гаргона Ю. М. (2008в) Климатогенные изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий // Изв. РАН. Сер. географическая. 2008. № 3. С. 26–34.
- Мироненко В. А., Станичный С. В. (1999) Возможности экологического мониторинга шельфа спутниковыми и полигонными средствами // Системы контроля окружающей среды: Сб. тр. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. 303 с.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2007) Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 317–324.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2008) Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 155–164.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2009) Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2010) Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 260–272.
- Митягина М. И., Чурюмов А. Н. (2006) Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 135–139.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. (2004) Наблюдение подветренных волн и вихревых структур за природными препятствиями в атмосфере при помощи радиолокационного зондирования морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 5. С. 44–50.
- Монин А. С., Жихарев Г. М. (1990) Океанские вихри // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160. В. 5. С. 1–47.
- Морозов Е. Г., Щука С. А., Запотьмько В. С. (2007). Буксирные спектры внутренних волн на пикноклине в Балтике // Докл. АН. 2007. Т. 412. № 4. С. 552–554.
- Нестеренко А. А., Романов А. А., Андреев М. В., Лурия Е. А. (2004) Общесистемное обеспечение отраслевой системы мониторинга Госкомрыболовства // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 204–212.

- Овсиенко С. Н., Фащук Д. Я., Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Петренко О. А. (2008)* Шторм 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе: хроника событий, математическое моделирование и географо-экологический анализ // *Тр. ГОИН. 2008. Вып. 211. М.: Гидрометеоздат., 2008. С. 307–339.*
- Овчинников И. М., Титов В. Б. (1990)* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // *Докл. АН СССР. 1990. Т. 314. № 5. С. 1236–1239.*
- Отчет о результатах работ (2004) по аэровизуальному мониторингу загрязнения прибрежной зоны Черного и Азовского морей за 2003 год / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2004. 93 с.
- Отчет о результатах работ (2005) по аэровизуальному мониторингу загрязнения прибрежной зоны Черного и Азовского морей за 2004 год / Росгидромет. СПб.: ДЕАН, 2005. 130 с.
- Патин С. А. (2001)* Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
- Пеллинен Л. П. (1985)* Высшая геодезия. М.: Недра, 1985. 128 с.
- Пиотух В. Б., Зацепин А. Г., Казьмин А. С., Якубенко В. Г., Станичный С. В., Ратнер Ю. Б. (2009)* Оценка влияния зимнего атмосферного форсинга на изменчивость термохалинных характеристик деятельного слоя Черного моря // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. Вып. 6. 2009. Т. 1. С. 442–450.*
- Победоносцев С. В. (1972)* Современные вертикальные движения побережий морей, омывающих Европейскую территорию СССР // *Океанология. 1972. Т. 12. № 4. С. 741–745.*
- Поляков В. М. (1995)* Дистанционное зондирование природной среды радиофизическими методами: Конспект лекций / Под ред. Б. А. Розанова. М.: Изд-во МГТУ, 1995. 104 с.
- Потайчук М. С. (1978)* Изменение температурного режима Северного Каспия при падении и повышении уровня моря // *Тр. ГОИН. 1978. Вып. 139. С. 65–71.*
- Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения (1995) / Под ред. Давидана И. Н. СПб.: Гидрометеоздат, 1995. 465 с.
- Рева Ю. А. (1997)* Межгодовые колебания уровня Черного моря // *Океанология. 1997. Т. 37. № 2. С. 211–219.*
- Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. (1978)* Введение в статистическую радиофизику. Т. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
- Сапожников В. В., Катунин Д. Н., Кирпичев К. Б. и др. (2003)* Гидролого-гидрохимические исследования Каспийского моря в рейсе научно-исследовательского судна «Исследователь Каспия» (23 августа – 8 сентября 2002 г.) // *Океанология. 2003. Т. 43. № 4. С. 529–534.*
- Серебряный А. Н. (1990)* Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.*
- Серебряный А. Н. (1993)* Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.*
- Синицына Н. Н., Субботин А. А., Савоськин В. М. и др. (1997)* Влияние загрязняющих стоков на морские экологические системы Черного моря и поиск методов их расчета и контроля // *Сб. тр. научн. конф. «Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря». 29 сент. – 3 окт. 1997, Севастополь. С. 81–85.*
- Скворцов Е. И., Раев М. Д., Булатов М. Г., Шарков Е. А., Лаврова О. Ю., Силкин В. А. (2010)* Радиофизические микроволновые исследования образования скоплений фитопланктона на морской поверхности // *Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 35–40.*
- Смирнова К. И. (1968)* Изменчивость элементов водного баланса Каспийского моря // *Тр. Гидрометцентра СССР. 1968. Вып. 34. С. 26–33.*
- Терзиев Ф. С., Никонова Р. Е. (2003)* Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // *Гидрометеорологич. аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна / Под ред. И. А. Шикломанова, А. С. Васильева. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 239–253.*
- Титов В. Б. (2002)* Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // *Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 668–676.*

- Троицкая Ю. И. (2000) Квазилинейная модель модуляции коротких поверхностных волн, возбуждаемых турбулентным ветром в присутствии волн зыби: Препринт № 607. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2000. 17 с.
- Троицкая Ю. И., Рыбушкина Г. В., Соустова И. А., Баландина Г. Н., Лебедев С. А., Костяной А. Г., Панютин А. А., Филина Л. В. (2010) Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов: Препринт ИПФ РАН. № 808. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 28 с.
- Тужилкин В. С., Косарев А. Н., Трухчев Д. И., Иванова Д. П. (1997) Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 91–99.
- Фащук Д. Я. (2008) По следам экстремального шторма // Наука и жизнь. 2008. № 6. С. 40–46.
- Фащук Д. Я. (2009) Эколого-географические последствия катастрофы танкера в Керченском проливе 11 ноября 2007 г. // Изв. РАН (Сер. геогр.). 2009. № 1. С. 105–117.
- Фащук Д. Я., Шапоренко С. И. (1995) Загрязнение прибрежных вод Черного моря: источники, современный уровень, межгодовая изменчивость // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 3. С. 273–281.
- Федоров К. Н., Гинзбург А. И. (1988) Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
- Филиппов Ю. Г. (2009) Изменчивость уровня Азовского моря на современном этапе // Тр. ГОИН. Вып. 212. 2009. С. 107–115.
- Фролов А. В. (2003) Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 2003. 171 с.
- Фукс И. М. (1966) К теории рассеяния радиоволн на взволнованной поверхности моря. Изв. вузов. Радиофизика. 1966. Т. 9. № 5. С. 876–882.
- Хржан А. Х. (1988) Физика атмосферы. М.: Изд-во МГУ, 1988. 327 с.
- Цурикова А. П., Шульгина Е. Ф. (1964) Гидрохимия Азовского моря. М.: Гидрометеиздат, 1964. 258 с.
- Шкломанов И. А. (1976) Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 79 с.
- Шнюков Е. Ф., Емельянов В. А., Кузнецов А. С., Куковская Т. С., Шипцов А. А. (2010) Геолого-геохимические исследования в 65-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в Черном море (июль-август 2010 г.) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 3. С. 94–98.
- Шнюков Е. Ф., Клещенко С. А. (2001) Грязевой вулканизм западного суббассейна Черного моря // Геологические проблемы Черного моря. Киев, 2001. С. 121–144.
- Шутко А. М. (1986) СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
- Afanasyev Y. D., Kostianoy A. G., Zatsepin A. G., Poulain P. M. (2002) Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea'99 experiment // J. Geophysical Research. Oceans. 2002, V. 107. N. C8. P. 3098–3108.
- Alishouse J. C. (1983) Total precipitable water and rainfall determinations from the SEASAT scanning multichannel microwave radiometer // J. Geophysical Research. 1983. V. 88. N. C3. P. 1929–1935.
- Alpers W. (1983) Imaging ocean surface waves by synthetic aperture radar: A review // Satellite Microwave Remote Sensing / Ed. N. D. AllaN. Ellis Horwood Ltd., 1983. P. 107–119.
- Alpers W. (1985) Theory of radar imaging of internal waves // Nature. 1985. N. 314. P. 245–247.
- Alpers W., Hühnerfuss H. (1989) The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophysical Research. 1989. V. 94. N. C5. P. 6251–6265.
- Alpers W. R., Ross D. B., Rufenach C. L. (1981) On the Detectability of Ocean Surface Waves by Real and Synthetic Aperture Radar // J. Geophysical Research. 1981. V. 86. N. C7. P. 6481–6498.
- Alpers W. R., Rufenach C. L. (1979) The Effect of Orbital Motions on Synthetic Aperture Radar Imagery of Ocean Waves // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1979. V. AP-27. N. 5. P. 685–690.

- Ambjörn C. (2004)* Forecasts of the trajectory and fate of spills, using Internet as the calculation platform // USA-Baltic Intern. Symp. "Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies". Klaipeda, Lithuania, 15–17 June. 2004: Abstr.
- Ambjörn C. (2006)* Seatrack Web, forecast of oil spills, the new version 2.0 // US/EU-Baltic Intern. Symp. on "Integrated Ocean Observation Systems for Managing Global & Regional Ecosystems Using Marine Research, Monitoring & Technologies". 23–25 May, 2006, Klaipeda, Lithuania: Abstr.
- Attema E. (1991)* The Active Microwave Instrument on-board the ERS-1 satellite // Proc. IEEE. 1991. V. 79. N. 6. P. 791–799. doi: 10.1109/5.90158.
- AVISO. (1996) AVISO User Handbook. Merged TOPEX/POSEIDON Products. AVISO, Toulouse, AVI-NT-02-101-CN. Ed. 3.0. 1996. 201 p.
- Barrick D. E. (1974)* Wind dependence of quasi-specular microwave scatter // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1974. V. 22. N. 1. P. 135–136. doi: 10.1109/TAP.1974.1140736.
- Barrick D., Lipa B. (1985)* Analysis and interpretation of altimeter sea echo // Advances in Geophysics. 1985. V. 27. P. 61–100. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60403-3.
- Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp H., Figa J., Anderson C. (2007)* Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) // Geophysical Research Letters. V. 34. P. L20401. 5 p. doi:10.1029/2007GL031088.
- Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I., Ostrovsky I. E., Rosenberg A. D. (1968a)* Very high frequency radio wave scattering by a disturbed sea surface. Pt I. Scattering from a slightly disturbed boundary // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1968. V. 16. N. 5. P. 554–559. doi: 10.1109/TAP.1968.1139243.
- Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I., Ostrovsky I. E., Rosenberg A. D. (1968b)* Very high frequency radio wave scattering by a disturbed sea surface. Pt. II. Scattering from an actual sea // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1968. V. 16. N. 5. P. 560–568. doi: 10.1109/TAP.1968.1139244.
- Belokopytov V. (1998)* Long-term variability of cold intermediate layer renewal conditions in the Black Sea // Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. NATO Science Series. Series 2: Environmental Security 47 / Eds. Ivanov L. I., Oguz T. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 47–52.
- Benada J. R. (1997)* PODAAC Merged GDR TOPEX/POSEIDON Generation B User's Handbook. Ver. 2.0. JPL D-11007. 1997. 131 p.
- Benveniste J. (2011)* Radar Altimetry: Past, Present and Future // Coastal altimetry / Eds. S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. 2011. Heidelberg; Dordrecht; L.; N.Y.: Springer, 2011. P. 1–17. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_1.
- Black P. G., Cardone V. J., Gentry R. C., Hawkins J. D. (1985)* Seasat Microwave Wind and Rain Observations in Severe Tropical and Midlatitude Marine Storms // Satellite Oceanic Remote Sensing / Ed. B. Saltzman; Advances in Geophysics. 1985. V. 27. P. 197–277. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60406-9.
- Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Jan G. (2010)* Absolute Calibration of Jason-1 and Jason-2 Altimeters in Corsica during the Formation Flight Phase // Marine Geodesy. 2010. V. 33. N. S1. P. 80–90. doi: 10.1080/01490419.2010.487790.
- Brekke C., Solberg A. (2005)* Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 95. N. 1. P. 1–13.
- Brown G. (1977)* The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. V. 25. N. 1. P. 67–74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536.
- Brown G. S. (1979)* Estimation of surface wind speeds using satellite-borne radar measurements at normal incidence // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. N. B8. P. 3974–3978. doi: 10.1029/JB084iB08p03974.
- Brown G. S., Stanley H. R., Roy N. A. (1981)* The wind speed measurement capability of spaceborne radar altimeters // IEEE J. Oceanic Engineering. 1981. V. 6. N. 2. P. 59–63. doi: 10.1109/JOE.1981.1145484.

- Brown S., Ruf C., Keihm S., Kitiyakara A. (2004)* Jason Microwave Radiometer Performance and On-Orbit Calibration // *Marine Geodesy*. 2004. V. 27. N. 1. P. 199–220. doi: 10.1080/01490410490465643.
- Callahan P.S. (1984)* Ionospheric variations affecting altimeter measurements: A brief synopsis // *Marine Geodesy*. 1984. V. 8. N. 1. P. 249–263.
- Carayon G., Steunou N., Courrire J.-L., Thibaut P. (2003)* Poseidon-2 Radar Altimeter Design and Results of In-Flight Performances // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. N. 3–4. P. 159–165. doi: 10.1080/714044516.
- Cartwright D.E., Edden A.C. (1973)* Corrected tables of tidal harmonics // *Geophysical J. International*. 1973. V. 33. N. 3. P. 253–264. doi: 10.1111/j.1365-246X.1973.tb03420.x.
- Chambers D.P., Roes J.C., Urban T.J. (2003)* Calibration and verification of Jason-1 using along-track residual with TOPEX // *Marine Geodesy*. V. 26. N. 3–4. P. 305–317. doi: 10.1080/714044523.
- Chang H.D., Hwang P.H., Wilheit T.T., Chang A.T.C., Staelin D.H., Rosenkranz P.W. (1984)* Monthly distribution of precipitable water from the Nimbus-7 SMMR data // *J. Geophysical Research*. 1984. V. 89. N. D4. P. 5328–5334.
- Chelton D.B. (1988)* WOCE/NASA Altimeter Algorithm Workshop. U.S. WOCE Technical Rep. N. 2. U.S. Planning Office for WOCE. College Station. 1988. 70 p.
- Chelton D.B., McCabe P.J. (1985)* A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: with a proposed new algorithm // *J. Geophysical Research*. 1985. V. 90. N. C7. P. 4707–4720. doi: 10.1029/JC090iC03p04707.
- Chelton D.B., Hussey K.J., Parke M.E. (1981)* Global satellite measurements of water vapour, wind speed and wave height // *Nature*. 1981. V. 294. N. 5841. P. 529–532. doi: 10.1038/294529a0.
- Chelton D.B., Wentz F.J. (1986)* Further development of an improved altimeter wind speed algorithm // *J. Geophysical Research*. 1986. V. 91. N. C12. P. 14250–14260. doi: 10.1029/JC091iC12p14250.
- Chelton D.B., Walsh E.J., MacArthur J.L. (1989)* Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 1989. V. 6. N. 3. P. 407–438. doi: 10.1175/1520-0426(1989)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2.
- Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.-L., Callahan P.S. (2001)* Satellite Altimetry // *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* / Eds. L. L. Fu, A. Cazenave. Academic Press, 2001. P. 1–131.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A. (2007)* Global observations of large oceanic eddies // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L15606. 5 p. doi: 10.1029/2007GL030812.
- Churyumov A.N., Kravtsov Y.A., Mityagina M.I., Morkotun A.V. (2003)* A Three-Component Composite Model of the Sea Surface: Incorporating Steep and Breaking Mesoscale Wavelets into the Two-scale Model // *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'03)*. 2003. V. 7. P. 4183–4185.
- Cracknell A.P., Hayes L.W. (2007)* Introduction to remote sensing. Boca Raton; L.; N.Y.: CRC Press. Taylor & Francis Ltd., 2007. 335 p.
- Davies K. (1980)* Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment // *Space Science Rev*. 1980. N. 25. P. 357–430. doi: 10.1007/BF00241558.
- Davies K., Hartman G.K., Leitinger R. (1977)* A comparison of several methods of estimating the columnar electron content of the plasmasphere // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1977. V. 39. N. 5. P. 571–580. doi: 10.1016/0021-9169(77)90066-6.
- Desjonquères J.D., Carayon G., Steunou N., Lambin J. (2010)* Poseidon-3 Radar Altimeter: New Modes and In-Flight Performances // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33. Suppl. 1. P. 53–79. doi: 10.1080/01490419.2010.488970.
- Dobson E.B., Monaldo F., Goldhirsh J., Wilkerson J. (1987)* Validation of GEOSAT altimeter-derived wind speeds and significant wave heights using buoy data // *J. Geophysical Research*. 1987. V. 92. N. C10. P. 10719–10732. doi: 10.1029/JC092iC10p10719.

- Doerffer R., Fiseher J. (1994)* Concentration of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff case II water derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. N. C4. P. 7457–7466.
- Dokken S. T., Wahl T. (1996)* Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images: FFI Rapport 96/01463. 1996.
- Dumont J. P., Sicard P., Stum J., Zanife O. Z. (2001)* Algorithm Definition, Accuracy and Specification. V. 4: CMA altimeter Level 2 processing. 2001. CNES. SMM-ST-M2-EA-11005-CN. 427 p.
- Dumont J. P., Thibaut P., Zanife O. Z., Soussi B., Benveniste J., Femenias P., Vincent P., Picot N. (2006)* CNES/NASA Radar Altimeters, Ocean Ground Processing and Products // 15 Years of Progress in Radar Altimetry Symp. Venice Lido, Italy, 13–18 Mar., 2006. ESA SP-614, 2006. 6 p.
- Dumont J. P., Rosmorduc V., Picot N., Desai S., Bonekamp H., Figa J., Lillibridge J., Scharroo R. (2009)* OSTM/Jason-2 Products Handbook. CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN. EUMETSAT: EUM/OPS-JAS/MAN/08/0041. JPL: OSTM-29-1237. NOAA/NESDIS: Polar Series/OSTM J400. Iss. 1. Rev. 4. 2009. 67 p.
- Ebuchi N., Graber H. C., Caruso M. J. (2002)* Evaluation of Wind Vectors Observed by QuikSCAT/SeaWinds Using Ocean Buoy Data // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. V. 19. N. 12. P. 2049–2062. doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<2049:EOWVOB>2.0.CO;2.
- Elachi C., van Zyl J. (2006)* Introduction To The Physics and Techniques of Remote Sensing. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 616 p.
- Ermakov S. A., DaSilva J. C., Robinson I. S. (1998)* The role of surface films in SAR signatures of internal waves on the shelf. II. Internal tidal waves // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. N. C4. P. 8033–8043.
- Espedal H. A., Johannessen O. M. (2000)* Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // *Intern. J. Remote Sensing*. 2000. V. 21. N. 11. P. 2141–2144.
- Ferraro G., Meyer-Roux S., Muellenhoff O., Pavliha M., Svetak J., Tarchi D., Topouzelis K. (2009)* Long term monitoring of oil spills in European seas // *Intern. J. Remote Sensing*. V. 30. Iss. 3. Feb. 2009. P. 627–645.
- Freilich M. H., Dunbar R. S. (1999)* The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: Comparisons with National Data Buoy Center buoys // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. N. C5. P. 11231–11246. doi:10.1029/1998JC900091.
- Frolking S., Milliman T., Palace M., Wisser D., Lammers R., Fahnestock M. (2011)* Tropical forest backscatter anomaly evident in SeaWinds scatterometer morning overpass data during 2005 drought in Amazonia // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. N. 3. P. 897–907. doi:10.1016/j.rse.2010.11.017.
- Fu L.-L., Pihos G. (1994)* Determining the response of sea level to atmospheric pressure forcing using TOPEX/Poseidon data // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. N. C12. P. 24633–24642.
- Gade M., Alpers W., Bao M. (1996)* Measurements of the radar backscattering over different oceanic surface films during the SIR-C/XSAR campaigns // *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'96)*. 1996. V. 2. P. 860–862.
- Garrett C., Munk W. (1972)* Space-time scales of internal waves // *Geophysical Fluid Dynamics*. 1972. V. 3. N. 3. P. 225–264.
- Gaspar P., Ogor F., Le Traon P.-Y., Zanife O. Z. (1994)* Estimating the sea state bias of the TOPEX and Poseidon altimeters from crossover differences // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. N. C12. P. 24981–24994.
- Gelsthorpe R. V., Schied E., Wilson J. J. W. (2000)* ASCAT – Metop's Advanced Scatterometer // *ESA Bull.* 2000. V. 102. P. 19–27.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Soloviev D. M., Stanichny S. V. (2000)* Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // *Satellites, Oceanography and Society* / Ed. D. Halpern. Elsevier, 2000. P. 273–287.

- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Krivosheya V. G., Nezlin N. P., Soloviev D. M., Stanichny S. V., Yakubenko V. G. (2002) Meso-scale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // *J. Marine System*. 2002. V. 32. P. 71–90.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. (2004) Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // *J. Marine Systems*. 2004. V. 52. N. 1–4. P. 33–50.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. (2005) Sea surface temperature variability // *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. V. 5. Pt. P. P. 59–81. doi: 10.1007/698_5_004.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. (2008a) Sea surface temperature variability // *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Pt. Q. P. 255–275. doi: 10.1007/698_5_067.
- Ginzburg A. I., Zatsepin A. G., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. (2008b) Mesoscale water dynamics // Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (Eds.) *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution. Pt. Q.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. Y., 2008. P. 195–216.
- Grandell J., Pallonen J., Hallikainen M., Toikka M. (1993) Scatterometer measurements of Arctic sea ice at C-band // *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 1993. V. 2. P. 853–854. doi: 10.1109/IGARSS.1993.322204.
- Guymer T. H. (1983) A Review of Seasat Scatterometer Data // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.* 1983. V. 309. N. 1508. P. 399–414. doi: 10.1098/rsta.1983.0051.
- Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K. (2010) Global surface temperature change // *Rev. Geophysics*. 2010. V. 48. RG4004. doi: 10.1029/2010RG000345.
- HELCOM Eutrophication (2009) in the Baltic Sea — An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region // *Baltic Sea Environment Proc.* 2009. N. 115. Helsinki: HELCOM. 148 p.
- HELCOM Response (2009) Illegal discharges of oil in the Baltic Sea during 2009. HELCOM Indicator Fact Sheets 2009. [Электрон. дан.]. Режим доступа: http://www.helcom.fi/BSAP_assessment/ifs/ifs2010/en_GB/illegaldischarges/ (посл. обрац. 20 нояб. 2010).
- Imel D. (1994) Evaluation of the TOPEX/Poseidon dual-frequency ionosphere correction // *J. Geophysical Research.* 1994. V. 99. N. C12. P. 24895–24906. doi: 10.1029/94JC01869.
- IOC (2006) Manual on Sea-level Measurements and Interpretation. V. 4: An update to 2006. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. IOC Manuals and Guides No. 14. V. 4; JCOMM Technical Report No. 31; WMO/TD. N. 1339. 78 p.
- Irving D., Simmonds I., Keay K. (2010) Mesoscale Cyclone Activity over the Ice-Free Southern Ocean: 1999–2008 // *J. Climate.* 2010. V. 23. N. 20. P. 5404–5420. doi: 10.1175/2010JCLI3628.1.
- Jackson C. R., Apel J. R. (2002a) Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://www.sarusersmanual.com>.
- Jackson C. R., Apel J. R. (2002b) An atlas of internal solitary-like waves and their properties // *Global Ocean Associates.* 2002.
- Jackson F. C., Walton W. T., Walter B. A., Peng C. Y. (1992) Sea surface mean square slope from Ku-band backscatter data // *J. Geophysical Research.* 1992. V. 97. N. C7. P. 11411–11427. doi: 10.1029/92JC00766.
- Jacques S. (1994) A comparison between TOPEX microwave radiometer, ERS-1 microwave radiometer, and European Centre for Medium-Range Weather Forecasting derived wet tropospheric corrections // *J. Geophysical Research.* 1994. V. 99. N. C12 P. 24927–24939.
- Jason-1 (2003) Jason-1: Satellite and system performance // *AVISO Altimetry Newsletters.* 2003. N. 9. 24 pp.

- Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon P. (1994)* SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division. ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 1994. 106 p.
- Johannessen J., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B. (2005)* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // *J. Geophysical Research*. V. 110. N. CO717. P. 1–14.
- Kanevsky M.V. (1993)* On the theory of SAR ocean wave imaging // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1993. V. GE-31. N. 5. P. 1031–1035.
- Kao T.W., Pao H.P., Park G. (1978)* Surface intrusions, fronts and internal waves: a numerical study // *J. Geophysical Research*. 1978. V. 83. C9. P. 4641–4650.
- Katsaros K.B., Bentamy A., Bourassa M., Ebuchi N., Gower J., Liu W.T., Vignudelli S. (2011)* Climate Data Issues from an Oceanographic Remote Sensing Perspective // *Remote Sensing of the Changing Oceans* / Ed. D.L. Tang. Heidelberg; Dordrecht; L.; N.Y.: Springer, 2011. P. 7–32. doi: 10.1007/978-3-642-16541-2_2.
- Kazmin A.S., Zatsepin A.G. (2007)* Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // *J. Marine Systems*. 2007. V. 68. N. 1–2. P. 293–301.
- Keihm S.J., Janssen M.A., Ruf C.S. (1995)* TOPEX/POSEIDON microwave radiometer (TMR): III. Wet troposphere range correction algorithm and pre-launch error budget // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. N. 1. P. 147–161. doi: 10.1109/36.368213.
- Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. et al. (2005)* Bio-optical characteristics of the seas of Russia from data of the SeaWiFS satellite ocean color scanner. Moscow: P.P. Shirshov Inst. of Oceanology Russian Acad. of Sciences, 2005. [Электрон. текст]. 1 CD-ROM.
- Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J. (2001)* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. N. CI. doi: 10.1029/2000JC900120. P. 917–934.
- Kosarev A.N. (2005)* Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer-Verlag, 2005. V. 5P. P. 5–31. doi: 10.1007/698_5_002.
- Kosarev A.N., Kostianoy A.G. (2005)* Kara-Bogaz-Gol Bay // *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. Springer-Verlag, 2005. V. 5P. P. 211–221. doi: 10.1007/698_5_011.
- Kosarev A.N., Arkhipkin V.S., Surkova G.V. (2008a)* Hydrometeorological conditions // *The Black Sea Environment*. Springer-Verlag, 2008. *The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. 2008. V. 5Q. P. 135–158. doi: 10.1007/698_5_086.
- Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Shiganova T.A. (2008b)* The Azov Sea // *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. Springer-Verlag, 2008. V. 5Q. P. 63–89. doi:10.1007/698_5_091.
- Kostianoy A.G. (2005a)* Complex monitoring of coastal zones in the Black, Caspian and Baltic Seas // 2nd EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone. Porto, Portugal, 9–10 June, 2005: Abstr. 2005. P. 34–35.
- Kostianoy A.G. (2005b)* Satellite monitoring of oil pollution in the Black, Azov, Caspian and Baltic seas // 3^d Intern. Caspian and Black Sea Ecology Summit and Showcase “Black Sea and Caspian Ecology 2005”. 24–25 Nov., 2005, Istanbul, Turkey. 2005: Proc. P. E27–E28 (на англ. яз.); R135–R137 (на рус. яз.).
- Kostianoy A.G. (2006a)* Satellite monitoring of oil pollution in the European Coastal Seas // EMECS 7: 7th Intern. Conf. Environmental Management of Enclosed Coastal Seas. 9–12 May, 2006, Caen, France: Abstr.
- Kostianoy A.G. (2006b)* Satellite monitoring of oil pollution in the European seas // ISRS 2006 PORSEC Conf. BEXCO, Busan, Korea, 2–4 Nov., 2006: Proc. 2006. P. 977–980.
- Kostianoy A.G. (2008)* Satellite monitoring of oil pollution in the European Coastal Seas // *OCEANIS*. 2008. V. 34. N 1/2. P. 111–126.

- Kostianoy A. G.* (2012). Oil pollution in the Baltic Sea: Sources, trends, problems, and solutions // Encyclopedia of Environmental Management / Ed. S. E. Jorgensen. N. Y.: Taylor and Francis, 2012 (в печати).
- Kostianoy A. G., Kosarev A. N.* (Eds.) (2005) The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution. Pt. 5P. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. Y., 2005. 271 p.
- Kostianoy A. G., Kosarev A. N.* (Eds.) (2008) The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5. Water Pollution. Pt. 5Q. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. Y., 2008. 457 p.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu.* (Eds.) (2012) Oil pollution in the Baltic Sea. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2012 (в печати).
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E.* (2004a) Oil spill monitoring in the southeastern Baltic Sea // USA-Baltic Intern. Symp. "Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies". Klaipeda, Lithuania, 15–17 June, 2004: Abstr. 2004. P. 80–81.
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E.* (2004b) Satellite remote sensing of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // PORSEC-2004: Proc. Gayana, Concepcion, Chile, 29 Nov. – 3 Dec., 2004. V. 68. N. 2. Pt. 2. P. 327–332.
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E.* (2005a) Oil spill monitoring in the Southeastern Baltic Sea // Environmental Research, Engineering and Management. 2005. N. 3(33). P. 73–79.
- Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Pichuzhkina O. E.* (2005b) Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // Oceans'05 Europe, IEEE Conf. and Exhibition. Brest, France, 20–23 June, 2005: Abstr. 2005.
- Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Pichuzhkina O. E.* (2005c) Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // Oceans 2005 — Europe. 20–23 June, 2005. 2005. V. 1. P. 182–183. doi: 10.1109/OCEANSE.2005.1511706.
- Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M., Pichuzhkina O. E.* (2006a) Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 1.5 years experience // US/EU-Baltic Intern. Symp. "Integrated Ocean Observation Systems for Managing Global & Regional Ecosystems Using Marine Research, Monitoring & Technologies". 23–25 May, 2006, Klaipeda, Lithuania: Abstr. 2006. P. 88–89.
- Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M., Pichuzhkina O. E.* (2006b) Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience // Environmental Research, Engineering and Management. 2006. N. 4(38). P. 70–77.
- Kostianoy A., Ambjörn C., Soloviev D.* (2007a) Complex satellite monitoring of the Baltic Sea marine protected areas // European Symp. Marine Protected Areas as a Tool for Fisheries, Management and Ecosystem Conservation. Murcia, Spain, 25–28 Sept., 2007: Abstr. P. 170.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M.* (2007b) Complex monitoring of oil pollution in the Baltic, Black and Caspian Seas // Envisat Symp. 2007. Montreux, Switzerland, 23–27 Apr., 2007: Proc.
- Kostianoy A., Ambjörn C., Soloviev D.* (2008) Seatrack Web: a numerical tool to protect the Baltic Sea marine protected areas // US/EU Baltic 2008 Intern. Symp. "Ocean Observations, Ecosystem-Based Management and Forecasting". 27–29 May, 2008, Tallinn, Estonia: Proc. 2008.
- Kouraev A. V., Cretaux J.-F., Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Mamedov R., Zakharova E. A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Berge-Nguyen M.* (2011) Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // Coastal Altimetry / Eds. Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipol-

- lini P., Benveniste J. Berlin: Springer-Verlag, 2010, P. 331–366, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_13.
- Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. (2003)* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. N. C3. FET2. 24 p. doi: 10.1029/2001JC001003.
- Lambin J., Morrow R., Fu L.-L., Willis J.K., Bonekamp H., Lillibridge J., Perbos J., Zaouche G., Vaze P., Bannoura W., Parisot F., Thouvenot E., Coutin-Faye S., Lindstrom E., Mignogno M. (2010)* The OSTM/Jason-2 Mission // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33. Suppl. 1. P. 4–25. doi: 10.1080/01490419.2010.491030.
- Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu. (2006)* Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // *Advance in Space Research*. 2006. V. 38 (10) P. 2162–2168.
- Lavrova O., Sabinin K. (2008)* Surface manifestations of internal soliton trains in non-tidal seas // 3rd US/EU-Baltic Intern. Symp. Ocean Observations, Ecosystem-Based Management & Forecasting. May 27–29, 2008. Tallinn, Estonia.
- Lavrova O., Bocharova T., Kostianoy A. (2006a)* Satellite radar imagery of the coastal zone: slicks and oil spills // *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space* / Ed. A. Marcal. Rotterdam, Netherlands: Millpress Science Publishers, 2006. P. 763–771.
- Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoy A. G. (2006b)* An approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones // *Advances in SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions. SEASAR-2006*. Frascati, Roma, Italy, 23–26 Jan., 2006.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. (2007)* Multi-Sensor Observation of Meso-Scale Features in European Coastal Waters // *Remote Sensing of the European Seas* / Eds. V. Barale, M. Gade. Springer, 2007. P. 463–474.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. (2008a)* Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // *Remote Sensing of the European Seas* / Eds. Barale, Gade. Springer, 2008. P. 463–474.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Kostianoy A., Krovotyntsev V. (2008b)* Multisensor approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2008)*. 2008. V. 3. P. 1386–1389.
- Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. (2010a)* Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data // *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR-2010* / Ed. ESA. 2010. V. ESA-SP-679. 5 p.
- Lavrova O., Mityagina M., Sabinin K. (2010b)* Seiches and Internal Waves in the Caspian Sea // *SeaSAR 2010*, ed.: ESA, vol.: ESA-SP-656, 2010. 6 p.
- Le Provost J. M. (2001)* Ocean tides // *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* / Eds. L. L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. P. 267–304.
- Lebedev S. A., Kostianoy A. G. (2008a)* Investigation of the Caspian Sea surface dynamics based on the satellite altimetry and drifter data // 37th COSPAR Scientific Assembly. Montreal, Canada, 13–20 July, 2008: Abstr. CD. ISSN 1815-5619, A21-0033-08.
- Lebedev S. A., Kostianoy A. G. (2008b)* Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea: Special Iss. “Satellite Altimetry Over Land and Coastal Zones: Challenges and Applications” // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2008. V. 19. N. 1–2. P. 71–82. doi: 10.3319/TAO.2008.19. 1-2.116(SA).
- Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Pichuzhkina O. E., Stanichny S. V. (2005)* Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // 31st Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. St.-Petersburg, 20–24 June, 2005: Abstr.
- Lefevre J. M., Cotton P. D. (2001)* Ocean surface waves // *Satellite Altimetry and Earth Sciences. Handbook of Techniques and Applications* / Eds. L. L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press. 2001. P. 305–328.

- Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P., Stephens C. (2000) Warming of the World Ocean // *Science*. 2000. V. 287. N. 5461. P. 2225–2229.
- Litovchenko K. Ts., Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu. (2005a) Operational monitoring of oil spills in the Baltic Sea using ENVISAT ASAR // *EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone*. Porto, Portugal, 9–10 June, 2005: Abstr. 2005. P. 97.
- Litovchenko K. Ts., Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu. (2005b) Operational monitoring of oil spills in the Baltic Sea using Envisat ASAR // *31st Intern. Symp. Remote Sensing of Environment*. St.-Petersburg, 20–24 June, 2005: Abstr. 2005.
- Liu W. T. (1984) Estimation of latent heat flux with SEASAT SMMR, a case study in the North Atlantic // *Large-Scale Oceanographic Experiments and Satellites* / Eds. C. Gautier, M. Fieux. NATO Science Series: NATO Advanced Research Workshop on Large-Scale Oceanographic Experiment. 1984. P. 205–221.
- Long D. G., Skouson G. B. (1996) Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1996. V. 34. N. 2. P. 413–424. doi: 10.1109/36.485119.
- Lorell J., Colquitt E., Anderle R. J. (1982) Ionospheric correction for SEASAT altimeter height measurements // *J. Geophysical Research*. 1982. V. 87. N. C5. P. 3207–3219.
- Matishov G., Matishov D., Gargopa Y., Dashkevich L., Berdnikov S., Baranova O., Smolyar I. (2006) *Climatic Atlas of the Sea of Azov*. NOAA Atlas NESDIS 59 / Eds. Matishov G., Levitus S., Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 2006. 103 p. [Электрон. данные] CD-ROM.
- Marshall J. A., Zelensky N. P., Klosko S. M., Chinn D. S., Luthcke S. B., Rachlin K. E., Williamson R. G. (1995) The temporal and spatial characteristics of TOPEX/POSEIDON radial orbit error // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. N. C12. P. 25331–25352.
- Medvedev P. P., Lebedev S. A., Tyupkin Yu. S. (1997) An Integrated Data Base of Altimetric Satellite for Fundamental Geosciences Research // *Proc. 1st East-European Symp. Advances in Data Bases and Information Systems (ADBIS'97)*. St.-Petersburg, Russia, 25 Sept. 1997. St.-Petersburg: St.-Petersburg University, 1997. V. 2. P. 95–96.
- Ménard Y., Fu L. L. (2000) Jason-1 on the tracks of TOPEX/Poseidon // *AVISO Newsletters*. 2000. N. 7. P. 3–8.
- Menard Y., Haines B. (2001) Jason-1 CALVAL Plan. JPL TP2-J0-PL-974-CN (PO.DAAC). 114 p.
- Ménard Y., Fu L.-L., Escudier P., Parisot F., Perbos J., Vincent P., Desai S., Haines B., Kunstmann G. (2003) The Jason-1 Mission // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. N. 3–4. P. 131–146. doi: 10.1080/714044514.
- Miller L. S. (1979) Topographic and backscatter characteristics of GEOS-3 overland data // *J. Geophysical Research*. 1979. V. 84. N. B8. P. 4045–4054. doi:10.1029/JB084iB08p04045.
- Mikhailov V. N., Mikhailova M. V. (2008) River mouths // *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Springer-Verlag, 2008. V. 5Q. P. 91–133. doi:10.1007/698_5_061.
- Mityagina M. I. (2006) Intensity of convective motions in marine atmospheric boundary layer retrieved from ocean surface radar imagery // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006. N. 13. P. 303–308.
- Mityagina M., Lavrova O. (2010) Comparative Analysis of Internal Waves Surface Manifestations Observed by Envisat ASAR in Different Non-Tidal Seas // *ESA Living Planet Symp. ESA Special Publication SP-686*. 2010. 6 p.
- Mityagina M., Churumov A. (2006) Radar backscattering at sea surface covered with oil films. *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space* / Ed. A. Marcal. Millpress. Rotterdam, Netherlands, 2006. P. 783–790.
- Mityagina M. I., Pungin V. G., Yakovlev V. V. (1998) Two-polarization Ku-band radar imagery of sea surface in presence of atmospheric boundary layer motions // *Waves in Random Media*. 1998. V. 8. P. 111–118.
- Mityagina M., Churumov A., Lavrova O. (2004) Problems in detecting oil pollution in Black Sea coastal zone by satellite radar means // *Proc. 2004 ERS and Envisat Symposium*.

- Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S. (2010)* Multi-Sensor Survey of Seasonal Variability in Coastal Eddy and Internal Wave Signatures in the North-Eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 17. P. 4779–4790.
- Mognard N. M., Lago B. (1979)* The computation of wind speed and wave heights from GEOS-3 data // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. N. B8. P. 3979–3986. doi: 10.1029/JB084iB08p03979.
- Moore R. K., Pierson W. J. (1966)* Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite // Proc. Intern. Symp. “Electromagnetic Sensing of Earth from Satellites”. Miami Beach, FL. 22–24 Nov., 1966. P. R1–R28.
- Moore R. K., Williams C. S. (1957)* Radar terrain return at near vertical incidence // Proc. Inst. Radio Engineers. 1957. V. 45. N. 2. P. 228–238. doi: 10.1109/JRPROC.1957.278394.
- Moore R. K., Spring W., Greenwood C., Fung A. K., Young J. D., Claassen J. P., Chan H. L., Afarani M., Pierson W. J., Cardone V. J., Hayes J. (1976)* Skylab S-193 RADSCAT microwave measurements of sea surface winds // Proc. NASA Earth Resources Survey Symp. Houston, Texas, 8–12 June, 1975. NASA TM X-58168. 1976. V. 1C. JSC-09930-Vol-1-c. P. 1937–1952.
- Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. (2000)* Spirals on the sea // Proc. Royal Society. Lond. A. 2000. V. 456. P. 1217–1280.
- Naderi F., Freilich M. H., Long D. G. (1991)* Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean—an overview of the NSCAT scatterometer system // Proc. IEEE. 1991. V. 79. N. 6. P. 850–866. doi: 10.1109/5.90163.
- Naeimi V., Bartalis Z., Wagner W. (2009)* ASCAT Soil Moisture: An Assessment of the Data Quality and Consistency with the ERS Scatterometer Heritage // J. Hydrometeorology. 2009. V. 10. N. 2. P. 555–563. doi:10.1175/2008JHM1051.1.
- Nash J. D., Moum J. N. (2005)* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. 437. P. 400–403.
- Obligis E., Desportes C., Eymard L., Fernandes M. J., Lózaró C., Nunes A. L. (2011)* Tropospheric Corrections for Coastal Altimetry // Coastal altimetry / Eds. S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini and J. Benveniste. Heidelberg; Dordrecht; L.; N. Y.: Springer, 2011. P. 147–176. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_6.
- Oguz T., Latun V. S., Latif M. A., Vladimirov V., Su H., Markov A., Ozsoy E., Kotovshchikov B., Ereemeev V., Unluata U. (1993)* Circulation in surface and intermediate layers of the Black Sea // Deep-Sea Research. 1993. V. 40. N. 8. P. 1597–1612. doi: 10.1016/0967-0637(93)90018-X.
- Pan J., Jay D. A., Orton P. M. (2007)*. Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. C07014, doi: 10.1029/2006JC003688.
- Patin S. (1999)* Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry. Ecomonitor Pub., 1999. 425 p.
- Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. (2003)* AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products. SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO). JPL D-21352 (PODAAC). 2003. Ed 2. 107 p.
- Plant W. J. (1997)* A model for microwave Doppler sea return at high incidence angles: Bragg scattering from bound, tilted waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. N. C9. P. 21131–21146.
- Poulain P.-M., Barbanti R., Motyzev S., Zatsepin A. (2005)* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1993–2003 // Deep-Sea Research. 2005. V. 52. P. 2250–2274.
- Quick Scatterometer Launch. NASA. (1999) 1999. 26 p.
- QuikSCAT (2001) Science Data User’s Manual. Overview & Geophysical Data Products. Ver. 2.2. JPL D-18053. 2001. 95 p.
- Quilfen Y., Chapron B., Vandemark D. (2001)* The ERS Scatterometer Wind Measurement Accuracy: Evidence of Seasonal and Regional Biases // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18. N. 10. P. 1684–1697. doi: 10.1175/1520-0426018<1684:TESWMA>2.0.CO;2.
- Rees W. G. (2001)* Physical Principles of Remote Sensing. 2nd ed. Cambridge Univ. Press, 2001. 372 p.

- Remote Sensing Using Microwaves (2003) /Eds. J. Askne. Chalmers Univ. Technology. Dep. Radio and Space Science. Goteborg. Sweden. 2003. 253 p.
- Robinso I. S.* (2004) Measuring the Oceans from Space: The principles and methods of satellite oceanography. Springer Praxis Books, 2004. 669 p.
- Romeiser R., Schmidt A., Alpers W.* (1994) A three-scale composite surface model for the ocean wave — radar modulation transfer function // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. N. C5. P. 9785–9801.
- Romeiser R., Ufermann S., Alpers W.* (2001) Remote sensing of oceanic current features by synthetic aperture radar — achievements and perspectives // *Annals of Telecommunications*. 2001. V. 56. N. 11/12. P. 661–671.
- Rush C. M.* (1986) Ionospheric radio propagation models and predictions — a mini review // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1986. V. 34. N. 9. P. 1163–1170. doi: 10.1109/TAP.1986.1143951.
- Sabinin K., Serebryany A.* (2005) Intense short-period internal waves in the ocean // *J. Marine Research*. 2005. V. 63. P. 227–261.
- Sandwell D. T., Smith W. H.* (2001) Bathymetric estimation // *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* / Eds. L. L. Fu, A. Cazenave). San Diego: Academic Press, 2001. P. 441–457.
- Satellite Altimetry and Earth Sciences* (2001) A Handbook of Techniques and Applications // Eds. L. L. Fu, A. Cazenave. Academic Press, 2001. 463 p.
- Scharroo R., Visser P. N. A. M.* (1998) Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. N. C4. P. 8113–8127. doi: 10.1029/97JC03179.
- Scharroo R., Wakker K. F., Mets G. J.* (1994) The orbit determination accuracy of the ERS-1 // *Proc. Second ERS-1 Symp. "Space at the Service of our Environment"*. Hamburg, Germany, 11–14 Oct., 1993. European Space Agency Spec. Publ., ESA SP-361, 1994. P. 735–740.
- Seeber G.* (2003) *Doppler Techniques* // *Satellite Geodesy*. Berlin, N. Y.: Walter de Gruyter, 2003. P. 181–210. doi: 10.1515/9783110200089.181.
- Seelye M.* (2004) *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. Cambridge Univ. Press, 2004. 454 p.
- Sharp M., Wang L.* (2009) A Five-Year Record of Summer Melt on Eurasian Arctic Ice Caps // *J. Climate*. 2009. V. 22. N. 1. P. 133–145. doi: 10.1175/2008JCLI2425.1.
- Shcherbak S. S., Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Bocharova T. Y., Krovotyntsev V. A., Ostrovskii A. G.* (2008) Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // *Intern. J. Remote Sensing*. 2008. V. 29. Iss. 21. Nov. 2008. P. 6331–6345.
- Shipilova L. M.* (2000) Eddy formation in the Caspian Sea // *Dynamic Earth Environments. Remote Sensing Observations from Shuttle-Mir Missions* / Eds. K. P. Lulla, L. V. Dessinov. John Wiley&Sons, Inc. 2000. P. 211–219.
- Shum C. K., Parke M. E., Zlotnicki V.* (1999) Improved ocean radar altimeter and scatterometer data product for global change studies and coastal application // *ESIP GFO Rep.* Febr. 25, 1999. 6 p.
- Siegel H., Gerth M.* (2008) Optical remote sensing applications in the Baltic Sea // *Remote sensing of the European Seas* / Eds. V. Barale, M. Gade. Springer Verlag, 2008. P. 91–102.
- Smith A. J. E., Hesper E. T., Kuijper D. C., Mets G. J., Visser P. N. A. M., Ambrosius B. A. C., Wakker K. F.* (1994) TOPEX/Poseidon Data Analysis Study. Final Rep. // *ESOC contract 10261/92/D/CS*. Delft University of Technology. Dep. Aerospace Engineering. Section Space Research & Technology. Delft. 1994. 163 p.
- Smith E. K., Weintraub S.* (1953) The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // *Proc. Inst. Radio Engineers*. 1953. V. 41. N. 4. P. 1035–1037.
- Soicher H.* (1986) Variability of transionospheric signal time delay at subauroral latitudes // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1986. V. 34. N. 11. P. 1313–1319. doi: 10.1109/TAP.1986.1143756.
- Sokolova E., Stanev E. V., Yakubenko V.* et al. (2001) Synoptic variability in the Black Sea. Analysis of hydrographic survey and altimetric data // *J. Marine Systems*. 2001. V. 31. N. 1–3. P. 45–63.

- Staelin D. H., Kunzi K. F., Pettyjohn R. L., Poon R. K. L., Wilcox R. W., Waters J. W. (1976)* Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus-5 microwave spectrometer // *J. Applied Meteorology*. 1976. V. 15. N. 11. P. 1204–1214.
- Stashchuk N., Vlasenko V. (2009)* Generation of internal waves by a supercritical stratified plume // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. C01004, doi: 10.1029/2008JC004851.
- Stevenson R. E. (1989)* Oceanography from the Space Shuttle. Office of Naval Research. The Univ. Corporation for Atmospheric Research. 1989. 200 p.
- Stevenson R. E. (1998)* Spiral eddies: the discovery that changed the face of the oceans // *21st Century Science and Technology*. 1998. V. 11. P. 58–71.
- Stewart R. H. (1985)* Methods of Satellite Oceanography. Berkeley: Univ. California Press, 1985. 360 p.
- Sur H. I., Ilyin Yu. P. (1997)* Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1997. V. 39. P. 109–151.
- Sur H. I., Ozsoy E., Ibrayev R. (2000)* Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea // *Satellites, Oceanography and Society* / Ed. D. Halpern. Elsevier, 2000. P. 289–297.
- Sur H. I., Ozsoy E., Unluata U. (1994)* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. V. 33. P. 249–302.
- Sur H. I., Ozsoy E., Ilyin Y. P., Unluata U. (1996)* Coastal/deep ocean interactions in the Black Sea and their ecological/environmental impacts // *J. Marine Systems*. 1996. V. 7. № 2–4. P. 293–320.
- Tapley B. D., Lundberg J. B., Born G. H. (1982)* The SEASAT altimeter wet tropospheric range correction // *J. Geophysical Research*. 1982. V. 87. N. C5. P. 3213–3220. doi: 10.1029/JC087iC05p03213.
- Tolman H. L. (1989)* The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. Delft Univ. of Techn. ISSN 0169-6548. Rep. N. 89-2. 1989. 72 p.
- TOPEX/Poseidon Project. (1991) TOPEX Ground System Software Interface Specifications. V. 2: Design (SIS-2). Geophysical Data Records (GDR). Interim Geophysical Data Records (IGDR). PD-633-751-23-004, JPL D-8950. 1991. 133 p.
- Trifonova E., Demireva D. (2003)* An investigation of sea level fluctuations in Varna and Bourgas // *Трудове на Института по океанология Българска академия на науките*. Т. 4. Варна, 2003. P. 3–8.
- Troitskaya Yu. I. (1994)* Modulation of the growth rate of short surface capillary-gravity wind waves by a long wave // *J. Fluid Mechanics*. 1994. V. 273. P. 169–187.
- Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N. (2005)* Thermohaline structure and general circulation of the Caspian Sea waters // *The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. V. 5. Pt. P. P. 33–57. doi: 10.1007/698 5 003.
- Ufermann S., Romeiser R. (1999)* Numerical study on signatures of atmospheric convective cells in radar images of the ocean // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. N. C25. P. 25707–25720.
- UNESCO (2003) The integrated, strategic design plan for the coastal ocean observations module of the Global Ocean Observing System: GOOS Report N. 125 // *IOC information Documents Series*. 2003. N. 1183. 190 p.
- Urban T., Pekker T., Tapley B., Kruijzinga G., Shum C. (2001)*, A multiyear intercomparison of wet troposphere corrections from TOPEX/Poseidon, ERS-1 and ERS-2 Microwave Radiometers and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts model // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. N. C9. P. 19657–19669. doi: 10.1029/2001JC000486.
- Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P., Benveniste J. (Eds.) (2011)* Coastal Altimetry. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 578 p. doi:10.1007/978-3-642-12796-0.
- Vigo I., Garcia D., Chao B. F. (2005)* Change of sea level trend in the Mediterranean and Black seas // *J. Marine Research*. 2005. V. 63. N. 6. P. 1085–1100, doi: 10.1357/002224005775247607.
- Voronovich A. G., Zavorotny V. U. (2001)* Theoretical model for scattering of radar signals in Ku- and C-bands from a rough sea surface with breaking waves // *Waves in Random Media*. 2001. N. 11. P. 247–269.

- Wahr J.W. (1985)* Deformation of the Earth induced by polar motion // *J. Geophysical Research*. 1985. V. 90. N. B11. P. 9363–9368. doi: 10.1029/JB090iB11p09363.
- Walsh E.J. (1979)* Extraction of ocean wave height and dominant wavelength from GEOS 3 altimeter data // *J. Geophysical Research*. 1979. V. 84. N. B8. P. 4003–4010. doi: 10.1029/JB084iB08p04003.
- Walsh E.J., Uliana E.A., Yaplee B.S. (1978)* Ocean wave heights measured by a high resolution pulse-limited radar altimeter // *Boundary Layer Meteorology*. 1978. V. 13. N. 1–4. P. 263–276. doi: 10.1007/BF00913877.
- Walsh E.J., Jackson F.C., Hines D.E., Piazza C., Hevizi L., McLaughlin D., McIntosh R., Swift R.N., Scott J.F., Yungel J., Frederick E. (1990)* Frequency Dependence of Electromagnetic Bias in Radar Altimeter Sea Surface Range Measurements // *J. Geophysical Research*. 1991. V. 96. N. 11. P. 20571–20583. doi: 10.1029/91JC02097.
- WAMDI Group (1988)*. The WAM model — A Third Generation Ocean Wave Prediction Model // *J. Physical Oceanography*. 1988. V. 18. N. 12. P. 1775–1810.
- Wentz F.J., Peteherych S., Thomas L.A. (1984)* A model function for ocean radar cross sections at 14.6 GHz // *J. Geophysical Research*. 1984. V. 89. N. 3. P. 3689–3704. doi:10.1029/JC089iC03p03689.
- Wilson W.S., Lindstrom E.J., Apel R. (2009)* Satellite Oceanography, History and Introductory Concepts // *Measurement Techniques Sensors and Platforms; Sensors: A derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences* / Eds. J.H. Steele, S.A. Thorpe, K.K. Turekian. Elsevier Ltd. 2009. P. 509–523.
- Wilson J.J.W., Anderson C., Baker M.A., Bonekamp H., Saldana J.F. (2010)* Radiometric Calibration of the Advanced Wind Scatterometer Radar ASCAT Carried Onboard the METOP-A Satellite // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2010. V. 48. N. 8. P. 3236–3255. doi: 10.1109/TGRS.2010.2045763.
- Witter D.L., Chelton D.B. (1991)* A Geosat Altimeter Wind Speed Algorithm and a Method for Altimeter Wind Speed Algorithm Development // *J. Geophysical Research*. 1991. V. 96. N. C5. P. 8853–8860. doi: 10.1029/91JC00414.
- Wunsch C., Gaposchkin E.M. (1980)* On Using Satellite Altimetry to Determine the General Circulation of the Oceans with Application to Geoid Improvement // *Rev. Geophysics*. 1980. V. 18. N. 4. P. 725–745. doi: 10.1029/RG018i004p00725.
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. (2002)* Variability of water dynamics in the north-eastern Black Sea and its effect on water exchange between near-shore and off-shore parts of the basin // *Oceanology*. 2002. V. 42. Suppl. 1. P. S1–S15.
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.-M. (2003)* Observations of Black Sea Mesoscale Eddies and Associated Horizontal Mixing // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. N. C8. P. 3246. doi: 10.1029/2002JC001390, 2003. P. 2-1–2-27.
- Zatsepin A.G., Denisov E.S., Emelyanov S.V. et al. (2005)* Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea // *Oceanology*. 2005. V. 45. Suppl. 1. P. S13–S26.
- Zavorotny V.U., Voronovich A.G. (1998)* Two scale model and ocean radar Doppler spectra at moderate and low grazing angles // *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 1998. V. 46. N. 1. P. 84–92.
- Zhao C., Shum C.K., Yi Y. (2003)* Calibration Results of GFO // *Intern. Workshop on Satellite Altimetry* / Eds. C. Hwang, C. K. Shum, J. C. Li.; *Intern. Association of Geodesy Symposia*. V. 126. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. P. 41–46.

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 2.9.11

Заказ 2254

Формат 70×100¹/₁₆

Тираж 200

38,35 усл.-печ. л.