Основные результаты, полученные в 2016 г. в ходе исполнения третьего этапа работ по проекту «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации»

1. В 2016 г. получены и интегрированы в геопортал STS оперативные спутниковые данные для Черного, Балтийского, Каспийского, Баренцева и Карского морей следующих сенсоров:

a) Данные радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) европейского спутника Sentinel-1A. На момент написания отчета в STS интегрировано: 2386 изображений по Черному морю; 1592 изображений по Балтийскому морю, 1500 изображений по Каспийскому морю; 2932 изображения по Баренцеву морю (до 79 градуса с.ш.); 1794 изображения по Карскому морю. Практически все изображения получены на двух поляризациях зондирующего сигнала.

б) Данные сканирующих радиометров ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8; спектрорадиометров MODIS Terra/Aqua; гиперспектрометра HYPERION EO-1.

в) С конца сентября 2016 г. в информационную систему STS в автоматическом режиме стали поступать данные радиолокатора SAR-C Sentinel-1В. Параметры PCA Sentinel-1В идентичны PCA, установленному на Sentinel-1А. Наличие на орбите двух PCA дает возможность получать изображения одного и того же района каждый день.

г) С августа 2015 г. набор спутниковых данных для усвоения в систему расширен за счет данных нового многоспектрального сенсора оптического диапазона MSI (MultiSpectral Instrument) Sentinel-2A.OH оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов и шириной полосы обзора 290 км. Увеличение ширины полосы обзора наряду с высокой повторяемостью съемок позволяет отслеживать быстро изменяющиеся процессы в море. Миссия Sentinel-2 является продолжением программ SPOT и Landsat. Проведены исследования по сравнению синхронных данных MSI Sentinel-2A и OLI Landsat-8, полученных в восточной части Черного моря и в Лионском заливе. Показано, что на изображениях MSI Sentinel-2A находят свое отражение процессы, в частности, внутренние волны малых масштабов, которые не проявляются в данных OLI Landsat-8 (рис. 1). Результаты исследований по оценке возможностей и пригодности данных MSI Sentinel-2A для решения поставленных в проекте задач опубликованы в статье Lavrova et al. 2016а.



Рис. 1. Пример проявления мелкомасштабных цепочки квази-окружностей, связанных с инерционными течениями (1) и мелкомасштабных внутренних волн (2) на цветосинтезированном изображении (каналы 4, 3, 2) MSI Sentinel-2A от 1 августа 2016 г. Пространственное разрешение 10 м

2. На базе геопортала STS для акваторий Черного, Каспийского, Балтийского, Баренцева, и Карского морей составлена представительная выборка радиолокационных и оптических изображений за период 2004-2016 гг., содержащая примеры различения нефтяных загрязнений и их радиолокационных подобий иной природы.

В частности, для Балтийского моря накоплен большой архив данных, содержащих радиолокационные подобия нефтяных загрязнений, такие как: области цветения фитопланктона, биогенные слики, границы ветровых неоднородностей. Для Баренцева и Карского морей основными РЛ-подобиями являются проявления молодого льда (рис. 2). Для Черного моря основными РЛ-подобиями являются биогенные пленки и мелкомасштабные фронты.



Рис. 2. Пример РЛ-подобия нефтяных загрязнений. Проявление молодого льда (1) в районе нефтяной платформы «Приразломная» (2) на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1 A, полученном 17 сентября 2016 г. с разрешением 10 м над акваторией Печорского моря (юго-восточная часть Баренцева моря) (Lavrova et al. 2016b)

3. В 2016 году была проведена работа по интегральной оценке нефтяного загрязнения Балтийского моря по собственным и опубликованным ранее данным за 2004-2016 гг, полученным в ходе комплексного спутникового мониторинга Юго-Восточной Балтики.

Для этой цели были использованы радиолокационные изображения (РЛИ) со спутников ENVISAT Европейского космического агентства (ESA) (до апреля 2012 г.), RADARSAT-1 Канадского космического агентства (CSA) (до марта 2013 г.), RADARSAT-2 компании МакДональд, Деттвилер и Партнеры (MDA, Канада), COSMO-SkyMed-1, -2, -3, -4 Итальянского космического агентства (ASI), ТеггаSAR-Х Германского центра авиации и космонавтики (DLR), а также Sentinel-1A и Sentinel-1B ESA (рис. 3). За период спутниковых наблюдений Юго-Восточной Балтики с 2004 по 2016 год всего было проанализировано более 2100 РЛИ, которые с различной частотой (из-за особенностей съемки каждого спутника) покрывали частично или полностью исключительные экономические зоны (ИЭЗ) Дании, Германии, Польши России, Литвы, Латвии, Эстонии и Швеции. Полученные и проанализированные данные о нефтяном загрязнении использовались для определения: (1) причин нефтяного загрязнения; (2) акваторий с наибольшим нефтяным загрязнением и выявления зон экологического риска; (3) площади нефтяного загрязнения; (4) межгодовой изменчивости нефтяного загрязнения; (5) сезонной изменчивости нефтяного загрязнения. Были получены следующие основные результаты:

(1) На 2100 РЛИ выявлено боле 1250 отдельных нефтяных пятен и исследована их межгодовая изменчивость (рис 4).

(2) Анализ формы нефтяных пятен показал, что основным источником загрязнения поверхности моря являются движущиеся суда, которые оставляют за собой узкие пятна протяженной формы.

(3) Наиболее загрязненным районом Юго-Восточной Балтики является район к западу от Самбийского полуострова и на подходе к Калининградскому каналу (в районе Балтийска) (рис. 5). Рейд порта Балтийск и якорная стоянка вблизи него является наиболее загрязненной акваторией российского сектора Юго-Восточной Балтики. Нефтяные пятна концентрируются и вытягиваются вдоль основных судоходных трасс, идущих из Гдыни и Гданьска (Польша) на северо-запад и на северо-восток, из Калининградского канала (Россия) на северо-запад и на север, из Клайпеды (Литва) на запад и на юго-запад. Нефтяные пятна также концентрируются на подходах к портам Лиепая, Вентспилс и Рига (Латвия), а также вдоль основных судоходных трасс восточнее и южнее острова Готланд (Швеция), севернее границы ИЭЗ Швеции и Польши и вдоль двух судоходных трасс, ведущих из Клайпеды и Гданьского залива на запад (рис 5).

(4) Определены площади нефтяных загрязнений и исследована ее межгодовая изменчивость (рис. 4). С 2006 по 2011 г наблюдалось уменьшение площади нефтяного загрязнения, после чего последовал всплеск, за которым следует очередное уменьшение количества нефтяных пятен и их суммарной площади.

(5) Определена средняя площадь одного нефтяного пятна, которая в 2004-2015 гг варьировалась в пределах 2.3-6.6 км², при этом межгодовая изменчивость данного параметра не выявила никакой закономерности.

(6) Определена сезонная изменчивость количества нефтяных пятен и их суммарной площади, которая определяется сезонной изменчивостью ветровых условий в исследуемом районе, которая характеризуется более штормовыми условиями в осеннезимний период, что, в свою очередь, накладывает ограничения на возможность обнаружения нефтяных пятен на РЛИ (рис. 6, 7).



Рис. 3. Количество РЛИ, полученных и проанализированных со спутников, оснащенных PCA, с 2004 по 2015 г. (Булычева и др., 2016)



Рис. 4. Межгодовая изменчивость суммарной площади нефтяного загрязнения и количества обнаруженных нефтяных пятен



Рис. 5. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ в юговосточной части Балтийского моря в 2004-2015 гг. Представлена реальная форма пятен (Булычева и др., 2016)



Рис 6. Сезонная изменчивость количества обнаруженных нефтяных пятен



Рис 7. Сезонная изменчивость суммарной площади нефтяных пятен

4. Получены интегральные оценки нефтяных загрязнений в Чёрном и Каспийском морях за 2004-2015 гг., обусловленных сбросами с судов вод, загрязнённых нефтепродуктами, а также нефтяных загрязнений, обусловленных естественными выходами углеводородов с морского дна для Черного и Каспийского морей.

На основе анализа спутниковых данных установлено, что подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявляемых на спутниковых изображениях Чёрного моря, представляют собой нефтесодержащие плёночные загрязнения, обусловленные сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты. Основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются нефтесодержащие промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов.

В результате ретроспективного анализа спутниковых радиолокационных данных, полученных за пятилетний период в 2004-2008 гг. для северо-восточной части Чёрного моря выявлено 294 случая загрязнения морской поверхности нефтесодержащими плёнками, совокупная площадь которых составляет 1331 кв. км.

За период 2009-2016 гг. на всей акватории Чёрного моря выявлено около 1500 случаев загрязнения морской поверхности нефтесодержащими плёнками, содержащимися в судовых сбросах. Совокупная площадь загрязнений, обусловленных сбросами с судов вод, загрязнённых нефтепродуктами составляет более 5 000 кв. км.

С целью получения количественных оценок и выявления изменчивости параметров естественных нефтепроявлений на морской поверхности, проведён ретроспективный анализ всех радиолокационных изображений акватории Чёрного моря, полученных в районе континентального склона вблизи побережья Грузии, где расположены струйные газовыделения, «сипы», в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме

и в виде газогидратов. Установлено, что сликовые структуры, начальная точка которых имеет координаты 41°57′с.ш., 41°07′в.д., обусловлены естественными газо- и нефтепроявлениями в этом районе. Ежегодная интегральная площадь нефтепроявлений варьирует в пределах 550-750 кв. км. Площадь акватории, имеющей высокую вероятность загрязнения плёнками естественных нефтепроявлений, составляет около 850 кв. км (*Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 а; Лаврова и др., 2016*).

Создана интегральная карта нефтяных загрязнений Каспийского моря (рис. 8) и показано, что несанкционированные сбросы нефтепродуктов с судов не являются основным источником плёночных загрязнений морской поверхности, однако, к сожалению, их объёмы с каждым годом увеличиваются.



Рис. 8. Интегральная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным

На основе обобщения и анализа спутниковых данных выявлено, что основным источником поверхностного загрязнения открытых участков Каспийского моря в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов является поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий, а также из естественных и особенно искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря). Интегральная площадь, подверженная нефтяному загрязнению площадь вокруг нефтедобывающей платформы Нефтяные Камни превосходит 6000 кв. км.

В результате анализа спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом (рис. 9).



Рис. 9. Нефтяные слики на морской поверхности в результате подводного грязевого: (a) Фрагмент Sentinal-1 SAR изображения от 4 июня 2015 г, 14:36 UTC; (б) Фрагмент цветосинтезированного по данным Sentinel-2 MSI изображения от 19 августа 2016 г., 07:26 UTC

Интегральная площадь загрязнения нефтяного загрязнения морской поверхности в результате подводного грязевого вулканизма в юго-западной части Каспийского моря за год может достигать тысячи кв. км (*Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 a; Лаврова и др., 2016*).

5. Получены количественные оценки межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости естественного и антропогенного нефтяного загрязнения морской поверхности Чёрного и Каспийского морей за 2004–2015 гг. Выявлены районы наиболее интенсивного нефтяного загрязнения морской поверхности и его источники (Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 а; Лаврова и др., 2016).

Черное море.

На основе спутниковых данных подтверждено, что антропогенные нефтесодержащие загрязнения морской поверхности концентрируются вдоль основных судоходных трасс Стамбул – Новороссийск, Стамбул – Керченский пролив, Стамбул - Одесса и Стамбул - Туапсе. Кроме того, большое количество сбросов происходит вблизи крупных портов и вблизи входов в Босфор и Керченский пролив. Нефтяные загрязнения морской поверхности в результате судовых сбросов вдоль основных судоходных трасс являются наиболее многочисленными и зачастую отличаются большими размерами. Примеры распределений индивидуальных площадей нефтяных загрязнений морской поверхности, числа выявляемых ежегодно пятен и их совокупной площади, сезонная изменчивость количества нефтесодержащих пятен (рис. 10-12).



Рис. 10. Распределение индивидуальных площадей нефтесодержащих судовых сбросов на поверхности Чёрного моря, выявленных по спутниковым данным



Рис. 11. Сезонная изменчивость количества судовых сбросов на поверхности Чёрного моря, выявленных по спутниковым данным



Рис. 12. Количество выявленных по спутниковым радиолокационным данным судовых сбросов на поверхности Чёрного моря и их совокупная площадь. Данные за 2012-2014 гг. пропущены, в связи с тем, что в эти годы отсутствовали данные спутниковой радиолокации

По результатам проведённых спутниковых наблюдений выявлено, что восточная часть акватории Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии является районом интенсивного нефтяного загрязнения морской поверхности, обусловленного выходами естественных углеводородов с морского дна на поверхность. Построена карта нефтяного загрязнения поверхности Черного моря в этом районе за

2010-2016 гг., позволяющая оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности (рис. 13).



Рис. 13. Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности за 2010-2016 гг. над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Черного моря

Установлено, что площадь акватории, имеющей высокую вероятность загрязнения плёнками в результате естественных нефтепроявлений, составляет около 850 км², а плёнки под влиянием ветра и течений распространяются на расстояния до 45 км от точки выхода на морскую поверхность.

Выявлено, что в 2015-2016 гг. разгрузки происходили чаще: Нефтепроявления на морской поверхности были выявлены на 49,5% от всех РЛИ, полученных над районом интереса в 2009-2011 гг., тогда как в 2015-2016 нефтепроявления идентифицированы на 72% снимков, однако средний размер наблюдаемого нефтепроявления был несколько меньше (рис. 14). Следует подчеркнуть, что более трети всех выявленных на морской поверхности естественных нефтепроявлений имеют площади, превышающие 10 км², а в 20% выявленных случаев индивидуальные площади нефтепроявлений превосходят 20 км².

Распределение совокупных площадей загрязнения морской поверхности юго-восточной части Черного моря в результате естественных нефтепроявлений, выявленных за год по спутниковым данным, представлено на рис. 15.3аметно увеличение совокупной площади загрязнений в 2016 гг.



Рис.14. Изменчивость индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен природного происхождения в юго-восточной части Черного моря, выявленных по спутниковым данным



Рис. 15. Совокупные площади загрязнения морской поверхности юго-восточной части Черного моря в результате естественных нефтепроявлений, выявленные за год по спутниковым данным

Каспийское море

1) По результатам проведённых спутниковых наблюдений выявлено, что район нефтедобычи вблизи Апшеронского и Бакинского архипелагов является районом интенсивного нефтяного загрязнения морской поверхности.

На морской поверхности вокруг нефтедобывающих платформ в Среднем Каспии постоянно присутствует нефтяная пленка, размеры загрязнения варьируют от десятков до сотен кв. км. Изменчивость индивидуальных размеров нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи «Нефтяные камни», выявленных по спутниковым данным, представлена на рис. 16.



Рис. 16. Изменчивость индивидуальных размеров нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи «Нефтяные камни», выявленных по спутниковым данным

Построена карта нефтяного загрязнения поверхности Каспийского моря в районе Апшеронского и Бакинского архипелагов за 2010-2016 гг., позволяющая оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности в этом районе (рис. 17). Превалирует перенос загрязнения в юго-западном направления на расстояния до 70 км.



Рис. 17. Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности Каспйского моря в районе нефтедобычи «Нефтяные камни» за 2010-2016 гг., составленная по спутниковым данным

2) По результатам проведённых спутниковых наблюдений выявлено, поверхность Каспийского моря над Западным бортом Южно-Каспийской впадины являются районом интенсивного нефтяного загрязнения морской поверхности в результате грязевого вулканизма на морском дне.

Суммарные площади нефтепроявлений, обусловленных грязевулканической активностью, идентифицируемых на одном спутниковом изображении, варьируют от нескольких десятков до полутора сотен кв. км. Частота возникновения нефтепроявлений проявлений определяется сейсмологической обстановкой в Южном Каспии.

6. Исследована межгодовая и сезонная изменчивость и пространственное распределение вихревой и волновой активности в Чёрном, Балтийском и Каспийском морях.

Основное внимание в 2016 г. было уделено внутренним волнам в Каспийском море. По результатам анализа большого массива спутниковых изображений составлены карты пространственного распределения поверхностных проявлений внутренних волн (ВВ), идентифицированных по спутниковым данным в Каспийском море (рис. 18).

По спутниковым данным определены основные пространственно-временные характеристики ВВ, выявленных из данных дистанционного зондирования: длина волны количество волн в пакете, направление распространения, длина видимого фронта волны и его ориентация. Изменчивость основных характеристик пакетов ВВ, определенных по спутниковым данным, представлена на гистограммах, приведённых на рис. 18.



Рис. 18. Изменчивость основных характеристик пакетов BB, определённых по спутниковым данным

Длина фронта ведущей волны в пакете варьирует от 8 до 80 км, ширина пакета меняется в пределах от 1 до 6 км в зависимости от количества волн в пакете и их средней длины, максимальная длина волны в пакете изменяется в пределах от 150 до 2000 метров.



Рис. 19. Обобщенная карта-схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море, выявленных по спутниковым данным

Установлена значительная пространственно-временная изменчивость распределения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море (*Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 b*):

(1) поверхностные проявления ВВ присутствовали в спутниковых изображениях только в период с мая по октябрь во все годы наблюдений; (2) поверхностные проявления ВВ идентифицированы только в спутниковых данных, полученных для Среднего и Южного Каспия и не выявлены в спутниковых данных для северной части моря; (3) в период с начала мая до середины июня пакеты ВВ выявлены только в западной Южного Каспия; (4) в период с середины июня до конца июля середины пакеты ВВ выявлены в восточной части Среднего Каспия в районе Апшеронского порога; (5) в августе основной район проявления ВВ сдвигается к северо-востоку, проявления ВВ в основном обнаруживаются в восточной часть Среднего Каспия, к северу от апшеронского порога.

На рис. 19 представлена обобщенная карта-схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море, выявленных по спутниковым данным

По результатам сравнительного анализа спутниковых данных и опубликованных данных натурных измерений показано, 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 способствуют развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое. Отсутствие проявлений поверхностных проявлений ВВ в Северном Каспии объясняется отсутствием температурной стратификации в этой части моря.

7. Изучено и описано влияние вихревой и волновой динамики на распространение загрязнений и процесс самоочищения вод в тестовых акваториях.

В 2016 г. для исследования влияния вихревой динамики на распространение нефтяных загрязнений морской поверхности были определены следующие районы: юго-восточная часть Балтийского моря, западная часть Черного моря в районе дельты Дуная, северовосточная часть Черного моря (это наши традиционные тестовые районы); и два новых тестовых района: 1) восточная часть акватории Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии; 2) участок акватории Каспийского моря вблизи района нефтедобычи «Нефтяные камни». На морской поверхности в этих новых тестовых районах постоянно присутствует нефтяное загрязнение, посредством различных оптических механизмов проявляющееся в спутниковых радиолокационных И изображениях, они могут служить естественными «лабораториями». Ниже представлены результаты для новых тестовых районов.

Выявлено, что главными факторами, ответственными за, эволюцию и распространение поверхностных нефтяных сликов, обусловленных естественными нефтепроявлениями со дна моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии являются поверхностные течения. Под влиянием сформировавшейся в районе интереса картины ветра и течений траектория дрейфа нефтяной плёнки может сильно усложниться (*Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 a; Лаврова и др., 2016*).

На рис. 20 представлен пример нефтепроявления, площадь которого составляет около 60 кв. км. После выхода на поверхность нефтяная плёнка распространяется на северовосток, постепенно растекаясь и принимая под влиянием сложной структуры течений прихотливую изломанную форму. Слик, постепенно сужается, а затем, вовлекаясь в вихревые движения, сильно искривляется и распространяется в западном направлении и, фактически описав полуокружность, оказывается на расстоянии 31,5 км от точки всплытия.



Рис. 20.РЛИ SAR Sentinel -1A от 18.07.2016, 03:16 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря

Установлено, что процесс эволюции нефтяных пятен, выходящих на морскую поверхность Каспийского моря вблизи нефтедобывающих платформ, состоит из двух этапов: (1) на начальном этапе нефтяное загрязнение перемещается соответственно направлению локального приповерхностного ветра и трансформируется под его воздействием; (2) на втором этапе загрязнение захватывается локальными течениями, достигающими в этом районе скорости до 80 см/с, и под их воздействием эволюционирует.

Нефтяное загрязнение может переноситься на большие расстояния или оказывается вовлечённым в вихревые движения (*Mityagina, M., Lavrova, O., 2016 a; Лаврова и др., 2016*). Пример такой двух-этапной эволюции нефтяного пятна под воздействием ветра и течений представлен на рис. 21.



Рис. 21. Пример эволюции нефтяного загрязнения под воздействием приповерхностного ветра и течений. Фрагмент Envisat ASAR изображения от 24.06.2010, 06:36 UTC. Общая площадь нефтяного загрязнения 325 кв. км

На момент проведения радиолокационной съёмки в районе интереса наблюдался умеренный юго-западный ветер. После всплытия на поверхность нефть первоначально распространялась в северо-восточном направлении под воздействием приповерхностного ветра (голубая стрелочка на рисунке). На расстоянии 6,5 км от точки всплытия нефть захватывается течениями, обусловленными присутствием вихревого диполя и, совершив поворот, изменяет направление своего движения и распространяется в юго-западном направлении, т.е. навстречу ветру, вплоть до расстояния 40 км от начальной точки (жёлтые стрелочки на рисунке).

8. На основе комплексного анализа всей совокупной информации, полученной в ходе выполнения проекта, об источниках загрязнений акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей и механизмах их распространения, определены устойчивые зоны экологического риска, т.е. районы, наиболее подверженные нефтяным загрязнениям, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества.

Были обобщены результаты, полученные в ходе исполнения проекта за 3 года. Для каждого из видов загрязнений строились карты на основе индекса интенсивности покрытия морской поверхности загрязнениями различной природы. Данный параметр рассчитывался по стандартной методике. Например, для пленочных загрязнений (нефтяных или биогенных) I = Sпленки / Sзоны x n, где: I – индекс пленочных загрязнений, Sпленки – площадь распространения пленок; Sзоны – площадь зоны; n – частота (количество) проявлений пленок. Далее полученный индекс преобразовывался в систему баллов условной бонитировочной шкалы. Степень благополучия акваторий наносится на карту цветом в шкале баллов из определенного числа градаций. Зоне с минимальным значением индекса присваивается балл, равный 1, с максимальным индексом – максимальный балл. На рис. 22 приведен пример такой карты для судовых загрязнений в Черном море. Районы с максимальным загрязнением (III балла) отмечены

красным, с минимальным (I балл) – голубым. На основе построенных для каждого вида загрязнений карт, строились и описывались обзорные карты устойчивых зон экологического риска для каждого моря.



Рис. 22. Карта-схема интенсивности загрязнения поверхности Черного моря водами, содержащими нефтепродукты

Для Балтийского моря определены следующие устойчивые зоны экологического риска (рис. 23):

- Северо-западный конец Финского залива: высокий риск судовых нефтяных загрязнений и интенсивное цветение водорослей;

- юго-восточный конец Финского залива: обширные области загрязнения, связанные со строительством аванпорта Бронка и сбросом плохо очищенных сточных вод;

- область севернее о. Готланд, Куршский и Калининградский (Вислинский) заливы: ежегодное интенсивное цветение водорослей;

- область южнее и восточнее о. Готланд: регулярные сбросы с судов вдоль основных судовых трасс;

- Куршская коса: риск нефтяного загрязнения в случае аварии на платформе D-6;

- Гданьский залив, Хельская коса и Вислинский залив: высокий риск судовых нефтяных загрязнений, повышение содержания взвешенного вещества, связанное с вытоком реки Вислы и из Балтийского пролива.

- Бухта Приморская Калининградского залива: постоянный сброс плохо очищенных сточных вод из Калининградского отводного канала.



Рис. 23. Зоны экологического риска в Балтийском море. Оранжевым отмечены охраняемые области, включенные HELCOM в июне 2013г. Зоны экологического риска отмечены черными овалами(Lavrova et al., 2016 d)

Для Черного моря устойчивыми зонами экологического риска являются:

- Основные судоходные трассы, вдоль которых происходит несанкционированный сброс вод, содержащих нефтепродукты. К ним относятся судоходные трассы Стамбул – Новороссийск, Стамбул – Керченский пролив, Стамбул - Одесса и Стамбул – Туапсе;

- акватории портов, особенно, где функционируют нефтеналивные терминалы: крупные порты Болгарии, Турции, Румынии и Украины. В российской части Чёрного моря наибольшему загрязнению подвергается акватория в районе порта Новороссийск;

- районы якорных стоянок вблизи крупных портов и в черноморском предпроливье Керченского пролива, где происходит перевалка грузов с одного типа судна на другое;

- Керченский пролив: повышенная взмученность вод, вызванная работами по строительству Керченского моста и многочисленные пленочные загрязнения у выносных причалов Таманского перегрузочного комплекса, связанные с проведением технологических операций по перекачке нефти, нефтепродуктов и синтетических масел.

- восточная часть Черного моря: нефтяные загрязнения как антропогенного, так и естественного происхождения, особенно вблизи портов Батуми и Поти. Повышение содержания взвешенного вещества, связанное с выносами многочисленных рек, в первую очередь Риони и Чорох. Впадающие в Черное море вблизи крупных портов плюмы данных рек разносят загрязнения на большие расстояния.

- северо-западный шельф: самая мелководная часть Черного моря наиболее подвержена влиянию речного стока (80% всего стока в Черное море): Дунай, Днестр, Южный Буг, Днепр, Ингул; интенсивное цветение фитопланктона, нефтяные загрязнения вблизи портов;

- район дельты Дуная: возвышенное содержание взвешенного вещества, загрязнения вдоль судовых трасс вблизи берега;

- Геленджикская бухта: акватория вблизи крупного туристического центра с инфраструктурой не соответствующей повышенному туристическому потоку, сброс ливневой канализации практически прямо в море, наличие на Толстом мысу устаревшего глубоководного выпуска сточных вод. Слабый водообмен в закрытой бухте не способствует ее самоочищению.

В Каспийском море исследование проводилось в первую очередь для Среднего и Южного Каспия. Соответственно в их акваториях выявлены следующие устойчивые зоны экологического риска

- акватории открытых участков моря в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов: поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий;

- Западный борт Южно-Каспийской впадины: естественные грифоны (выход нефти на поверхность моря, результат грязевого вулканизма). Количество выбрасываемой нефти во время действия грифона может колебаться от 100 до 500 т;

- район судоходных трасс вблизи побережья Туркменистана: несанкционированных сброс судов загрязненных вод;

- прибрежные зоны Южного Каспия: интенсивное цветение фитопланктона

- восточная часть Южного Каспия: повышенное содержание взвеси, связанное с выносом реки Атрек во время половодья.

9. Установлена межгодовая и сезонная изменчивость и пространственное распределение волновой активности в Черном, Балтийском и Каспийском морях (Lebedev, 2016).

Межгодовой тренд изменчивости высот морских волн в Балтийском море изменяется в пределах от -1,92 до +2,36 м/год, а средняя для моря величина составляет +0,596±0,004 м/год. Максимальная скорость роста высот морских волн (более +1,8 м/год) наблюдается в

Рижском заливе, в Финском заливе у побережья Эстонии и в проливе Каттегат у побережья Швеции.

Межгодовой тренд изменчивости высот морских волн в Черном море изменяется в пределах от -0,53 до +2,09 м/год, а средняя для моря величина составляет +1,212±0,004 м/год. Максимальная скорость роста высот морских волн (более +1,8 м/год) наблюдается вдоль Абхазского и Грузинского побережья Кавказа. Вдоль побережья Турции в Восточной части моря климатические изменения высот морских волн почти отсутствуют. Межгодовой тренд изменчивости высот морских волн в Каспийском море изменяется в пределах от -0,14 до +0,07 м/год, а средняя для моря величина составляет -0,011±0,005 м/год. В Северном Каспии межгодовой тренд высот морских волн составляет -0,012±0,002 м/год. Однако вдоль побережья Казахстана вблизи устья реки Урал и Форт-Шевченко высоты ветровых волн практически отсутствует, хотя вдоль всего Казахстанского побережья, а также в центральной части он имеет положительную величину +0,06±0,003 м/год. В Южном Каспии практически вдоль всего побережья высоты ветровых волн падают, и только в центральной части растут. В среднем межгодовой тренд в этой части моря составляет -0,015±0,003 м/год (рис. 24).





10. Выявлена межгодовая изменчивость уровня Балтийского, Черного и Каспийского морей, выделены временные интервалы подъема или падения уровня моря и построены карты пространственной неоднородности скорости межгодовой изменчивости уровня.

Расчет изменчивости аномалий уровня за временной интервал с сентября 1992 г. по март 2016 г. проводился для точек пересечения треков. Далее результаты расчетов объединялись в единый ряд, Привязка временной изменчивости аномалий уровня *Каспийского моря* к балтийской системе проводилось на основании совместного анализа среднемесячных данных уровенных постов и результатов расчетов по данным спутниковой альтиметрии за временной интервал сентябрь 1992 г. – декабрь 2006 г. Результаты представлены на рисунках и таблицах.



Таблица 1. Скорости изменения уровня Балтийского моря в различные интервалы
времени

Π/Π	Временной интервал (годы)	Скорость изменения уровня моря, см/год		
1	сентябрь 1992 – май 1994	-19,21		
2	май 1994 – декабрь 1994	39,29		
3	декабрь 1994 – февраль 1996	-29,40		
4	февраль 1996 – ноябрь 1998	7,44		
5	ноябрь 1998 – декабрь 2002	-1,47		
6	декабрь 2002 – январь 2005	12,25		
7	январь 2005 – март 2006	-15,40		
8	март 2006 – январь 2007	66,02		
9	январь 2007 – февраль 2010	-7,26		
10	февраль 2010 – январь 2012	16,57		
11	январь 2012 – март 2013	-16,54		
12	март 2013 – декабрь2015	17,37		

Таблица 2. Скорости изменения уровня Черного моря в различные интервалы времени

п/п	Временной интервал	Скорость изменения уровня моря, см/год
1	сентябрь 1992 – июнь 1999	+2,64
2	июнь 1999 – апрель 2003	-1,23
3	апрель 2003 – июнь 2004	+20,72
4	июнь 2004 – февраль 2008	-8,59
5	февраль 2008 – июль 2010	+9,47
6	июль 2010 – февраль 2012	-17,57
7	февраль 2012 – апрель 2013	+19,76
8	апрель 2013 – декабрь 2015	-4,93

Таблица 3. Скорости роста и падения уровня Каспийского моря для четырех основных временных интервалов

п/п	Временной интервал	Скорость изменения уровня моря, см
1	26.09.1992 - 05.07.1995	+20,27
2	05.07.1995 - 30.11.2001	-7,22
3	30.11.2001 - 10.07.2005	+10,49
4	10.07.2005 - 31.03.2016	-10,33

Таблица 4. Скорости роста и падения уровня Каспийского моря для девяти временных интервалов

		. 1
Π/Π	Временной интервал	Скорость изменения уровня моря, см
1	26.09.1992 - 05.07.1995	+20,27
2	05.07.1995 - 31.01.1997	-32,49
3	31.01.1997 - 30.11.2001	-5,34
4	30.11.2001 - 10.07.2005	+10,49
5	10.07.2005 - 11.11.2008	-7,77
6	11.11.2008 - 09.06.2010	-0,39
7	09.06.2010 - 25.01.2012	-23,92
8	25.01.2012 - 18.01.2014	-5,80
9	18.01.2014 - 31.03.2016	-21,78







Рис. 27. Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Балтийского моря (см/год) (а) – с сентября 1992 г. по май 1994 г., (б) – с мая 1994 г. по декабрь 1994 г., (в) – с декабря 1994 г. по февраль 1996 г., (г) – с февраля 1996 г. по ноябрь 1998 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2.



Рис. 28. Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Черного моря (см/год) с января 1993 г. по декабрь 2015 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2.



Рис. 29. Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Балтийского моря (см/год) (а) – с сентября 1992 г. по июнь 1999 г., (б) – с июня 1999 г. по апрель 2003 г., (в) – с апреля 2003 г. по июнь 2004 г., (г) – с июня 2004 г. по февраль 2008 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2



Рис. 30. Карта межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря (см/год) для четырех основных периодов времени: (а) – сильное повышение (1993–1995 гг.), (б) – медленное падение (1995–2001 гг.), (в) – повышение (2001–2005 гг.) и (г) – современное падение (2005–2015 гг.)

11. Рассмотрена возможность применимости разработанных методик для оценки экологического состояния акваторий Баренцева и Карского морей и проведены первичные оценки их антропогенного и биогенного загрязнения и динамических процессов, влияющих на его распространение.

Апробация разработанных в ходе исполнения проекта методик оценки экологического состояния в тестовых районах акваторий Баренцева и Карского морей проводилась для прибрежной акватории вдоль Кольского полуострова, в Кольском заливе, для акватории

Печорского моря вокруг морской стационарной нефтяной платформы «Приразломная», южной части Карского моря и в Обской губе. Использовались радиолокационные данные SAR-C Sentinel -1A, -1B и данные видимого диапазона MSI Sentinel-2A за период июль-август 2016 г.

Результаты исследований показали, что пленочные загрязнения выявляются на радиолокационных изображениях, также, как и в других исследуемых нами морях. Такие загрязнения выявлены в Кольском заливе и вдоль судоходных трасс (рис. 31, 32).

Аномально-интенсивное цветение кокколитофоридов летом 2016 (что подтверждено, например, судовыми измерениями ИО РАН им. П.П. Ширшова), проявилось на изображениях всех сканеров цвета, включая MSI Sentinel-2A, не только в открытой части Баренцева моря, но и вдоль побережья Кольского полуострова. Квази-синхронные радиолокационные изображение выявили наличие на морской поверхности большого количества биогенной пленки (рис. 33, 34). Таким образом, показано, что и для Баренцева моря можно применять радиолокационные изображения, для выявления акваторий с повышенным содержанием фитопланктона, как это делается для других изучаемых нами обоснованных морей. Для получения статистически результатов необходимо проанализировать большой объем спутниковых данных и, в идеале, провести синхронные подспутниковые измерения.

Анализ радиолокационных снимков позволил выявить районы регулярного проявления внутренних волн и вихревых структур. Данные гидродинамические процессы имеют в арктических морях свою специфику и должны быть более детально изучены в будущем.



Рис. 31. Проявления возможных сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты (отмечены стрелками), на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1, полученном 25 августа 2016 над Кольским заливом



Рис. 32. Проявление сброса с судна вод, содержащих нефтепродукты (отмечено стрелкой), на РЛИ SAR-C Sentinel-1 от 20.08.16. Район судоходных трасс вдоль побережья Кольского полуострова



Рис. 33. Проявление интенсивного цветения фитопланктона на цветосинтезированном изображении (каналы 4-3-2) MSI Sentinel-2A от 5 августа 2016 г.___



Рис. 34. Проявление скопления биогенной пленки на морской поверхности в районе интенсивного цветения фитопланктона на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1 от 8 августа 2016 г.

12. Подспутниковые измерения.

Анализ результатов подспутниковых экспериментов, проведенных в 2014-2015 г. позволил:

• Выявить районы в северо-восточной части Черного моря и юго-восточной части Балтийского моря, где, как и по данным спутникового дистанционного зондирования, наблюдались наибольшие загрязнения морской среды.

<u>В Черном море</u>: Геленджикская бухта, акватория мористее Геленджикской бухты, район Толстого мыса, где находится «глубоководный» (давно устаревший с множеством разломов) выпуск сточных вод; строящийся в районе аэропорта Геленджик причал, Голубая бухта, якорная стоянка Дооб.

<u>В Балтийском море</u>: прибрежная зона вблизи г. Балтийска, Балтийский пролив, акватория вдоль западного и северного побережья Самбийского полуострова, Калининградский залив.

- Определить основные особенности прибрежных течений и их повторяемость.
- Исследовать термохалинную структуру вод в прибрежной зоне.

• Оценить возможности имеющегося океанологического оборудования и определить, что еще необходимо приобрести для более детальных измерений.

По результатам 2014-2015 гг. было решено провести подспутниковые измерения в июле 2016 г. в районе мыса Таран в Балтийском море и в сентябре 2016 г. на стандартном полигоне в районе Голубая бухта – Геленджикская бухта в Черном море.

Была выявлена необходимость использования дрейфующих буев для определения параметров течений в расширенном районе исследований. Для выполнения измерений с помощью ADCP независимого от глубины места было приобретено дополнительное оборудование - Hemisphere Vector V102 GPS Compass.

По результатам подспутниковых измерений в Балтийском море в 2014 г. опубликована статья в журнале Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing с импакт-фактором 2.145. (Lavrova et al., 2016 с)

Результаты натурных измерений описаны ниже.

Экспедиционные работы на Балтике в июле-августе 2015 г.

В 2015 году в рамках выполнения проекта была проведена экспедиция в Балтийское море с целью продолжения изучения вопроса верификации спутниковых изображений поверхности моря и изучения гидрометеорологических процессов, оказывающих влияние на распространение загрязнений по акватории Балтийского моря.

Экспедиционные работы проводились с 18 июля по 4 августа. Отправная точка экспедиционных работ располагалась на Балтийской косе, на базе НОЦ Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Измерения проводились по двум направлениям: прибрежный цикл работ выполнялся на моторной лодке в акватории Балтийского пролива (Калининградского морского канала) с целью изучения параметров вод, выносимых из Калининградского залива в открытое море; и морской этап - в акватории Балтийского моря на маломерном судне для изучения прибрежных течений и параметров распространения выноса из залива вод по акватории моря.

Работы в Калининградском заливе и в Калининградском морском канале включали в себя проведение СТД-зондирования для оценки термохалинной структуры вод для обнаружения случаев затока соленых вод из акватории Балтийского моря в лагуну, а также проведение измерений с помощью акустического профилографа течений (ADCP) для определения общего расхода потока воды через канал, а также определения общей структуры поля при выходе вод из канала в открытую часть моря. В ходе экспедиции было выполнено 10 выходов: 17 – 22, 25, 27, 28, 29 июля и 3 августа.

Работы в открытой части Балтийского моря включали в себя выполнение стандартных океанологических разрезов. Работы на них ведутся уже в течение нескольких лет (рис. 35).



Рис. 35. Район экспедиционных работ в 2015 г.

В ходе работ в открытой части моря было выполнено 4 океанологических разреза: Янтарный, Таран-Норд-Вест, Таран-Норд и Светлогорский (рис. 35). Океанологические работы на разрезах включали в себя: непрерывное зондирование толщи вод акустическим профилографом течений (ADCP) в диапазоне от 4 до 100 м по ходу движения судна, СТDзондирование для определения термохалинной структуры вод, а также определения параметра интегральной мутности вод при помощи датчика обратного рассеивания света. На рис. 35 точками показаны положения станций зондирования толщи вод от поверхности до дна. В ходе работ также проводился непрерывный мониторинг метеорологических условий при помощи автоматической метеостанции.

Как показали измерения с помощью ADCP на всех разрезах течение в открытой части моря являлось слабым, скорость не превышала 0,2 – 0,25 м/с. В прибрежной части скорость течения увеличивалась и достигала 0,5 м/с. (рис. 36).

Отличительной особенностью течения на разрезе Янтарный (04.08.2015) являлось наличие смены направления поверхностного течения. В глубинной части разреза наблюдалось преимущественно южное направление течений, в то время как в прибрежной части – северное. Скорость потока была не выше 0,2 м/с.



Рис. 36. Поверхностные течения на глубине 5 м на разрезах: а - Таран-Норд-Вест (24.07.2015); б - Светлогорский (27.07.2015); в - Таран-Норд (02.08.2015); г - Янтарный (04.08.2015)

На рис. 37 представлено характерное распределение интегральной мутности вод. Как показывают измерения, в открытой части моря значения мутности практически нулевые от поверхности до дна, при приближении к берегу величина общей мутности вод увеличивается до значений 3 NTU. Увеличение мутности вод наблюдается по всему профилю, как у дна, так и у поверхности.

Проявление мутных вод у берега отчетливо проявляется и на цветосинтезированном изображении OLI Landsat 8, полученном 4 августа 2015 (рис. 38). Подобная картина наблюдалась на всех изображениях видимого диапазона (MODIS Terra/Aqua; ETM+ Landsat-7).



Рис. 37. Распределение интегральной мутности вод на разрезе Светологорский 27.07.15



Рис. 38. Проявление вод повышенной мутности вдоль побережья Самбийского полуострова на цветосинтезированном изображении OLI Landsat 8, полученном 04.08.15

В ходе экспедиционных работ в районе мыса Таран был проведен запуск 2 лагранжевых дрифтеров с возможность дистанционной передачи данных в реальном времени. Дрифтеры были запущены 02.08.15 с борта судна в районе с координатами 55.0341 с.ш. 20.0117 в.д. и в районе 55.0031 с.ш. 20.0143 в.д. Один буй продрейфовал в течение 8-и

дней до момента потери сигнала GSM, второй - в течение 3-х дней. Дрифтер представляет собой пассивный плавучий объект с подводным парусом на глубине 1 метр, буй не имеет поверхностной части за исключением небольшого отсека для GSM-передатчика и GPS-приемника, что позволяет оценивать скорость поверхностных течений практически без влияния ветрового дрейфа. На рис. 39 показана схема движения буев в ходе эксперимента. Примечательно, что за время длительного недельного дрейфа буи лишь незначительно покинули район запуска. Дрейф буев представлял собой сложные циркуляционные движения в районе проведения экспедиционных работ, что подтверждается отсутствием установившихся течений в регионе по данным ADCP. Дрейф буя был осложнен наличием инерционных колебаний в открытой части моря. Также примечательно, что оба буя до момента потери связи с одним из них совершали практически идентичный дрейф.



Рис. 39. Схема движения лагранжевых буев в акватории Балтийского моря

Был проведен совместный анализ результатов дрифтерного эксперимента и спутниковых изображений, полученных в период его проведения. На цветосинтезированных изображениях в естественных цветах ETM+ Landsat-7 (рис. 40a), OLI Landsat-8 (рис. 40б), карте температуры поверхности моря (рис. 40в) хорошо видна вихревая структура в районе м. Таран. На эти изображения наложены траектории движений двух дрифтеров.





Рис. 40. Проявление вихревой структуры в районе м. Таран на спутниковых изображениях и наложенные на снимки траектории дрифтеров. Красным выделены участки траекторий, соответствующие времени пролета спутника: а – изображение ETM+ Landsat-7 от 3 августа 2015 г.; б – изображение OLI Landsat-8 от 4 августа 2015 г.; в – карта температуры поверхности моря, построенная по данным TIRS Landsat-8 от 4 августа 2015 г.

На изображении MODIS Aqua от 8 августа 2015 наблюдался вихревой диполь, циклоническая часть которого находилась северо-восточнее м. Таран (рис. 41а). Высказано предположение, что запущенный 2 августа в этом районе дрейфующий буй попал в зону влияния струй данного грибовидного течения. Часть траектории дрифтера имела вид антициклонических петель (рис. 41б), что, скорее всего, указывает на ИК струй эволюционирующего вихревого диполя (*Лаврова, Сабинин, 2016*).

Таким образом, результаты экспедиционных работ на Балтике в 2015 г. показали, что в сложившихся на момент проведения измерений метеоусловиях (преимущественно западный ветер, сменившийся в начале августа на северо-восточный), течение в открытой части моря было слабое. Направление течения менялось. Вдольбереговое течение достигало 0,5 м/с, постоянно меняющее свое направление и усиливающееся у берега. Измерения распределения интегральной мутности вод на разрезах в открытой части моря показали, что значения мутности практически нулевые от поверхности до дна, но при приближении к берегу величина общей мутности вод увеличивается. И увеличение мутности вод наблюдается по всему профилю, как у дна, так и у поверхности.



(a)

(б)

Рис. 41. Инерционные колебания струй эволюционирующего вихревого диполя: (a) проявление вихревого диполя на цветосинтезированном изображении MODIS Aqua от 8 августа 2015 г. и траектория движения дрифтера за период 2 – 11 августа 2015 г. Красным отмечена часть траектории, попадающая в дни спутниковых наблюдений; (б) увеличенное изображение траектории движения дрифтера. Стрелками отмечено направление движения (Лаврова, Сабинин, 2016)

Наибольший интерес представляли измерения с помощью дрейфующих буев, траектории которых имела вид антициклонических петель.

Экспедиционные работы на Балтике в июле-августе 2016 г.

В 2016 году были проведены экспедиционные работы в Балтийском море в период с 19 июля по 01 августа. В ходе экспедиционных работ проводилась съемка параметров течений при помощи акустического профилографа течений ADCP, закрепленного на маломерном судне. По ходу выполнения съемки проводилось зондирование толщи вод при помощи CTD-зонда и датчика общей мутности вод. Также в ходе выполнения работы в акваторию Балтийского моря было запущено 2 лагранжевых буя. В ходе работ было выполнено 7 разрезов в акваторию Балтийского моря (рис. 42).



Рис. 42. Район экспедиционных работ в 2016 г.

Результаты измерений течений в 2016 г. показали схожую картину с 2015 г.: в глубинной части течения слабые, не имеющие ярко выраженного направления, по мере приближения к берегу их скорость увеличивалась (рис. 43).



Рис. 43. Примеры течений на разрезах 2016 г., слева средние по всей толще, справа – на глубине 5 м: а - Таран-Вест (23.07.2016), б - Таран-Норд (23.07.2016)

Практически на всех разрезах наблюдалось увеличение величины обратного рассеивания до глубины в 13 м с значениями 76-83-дБ.

В период проведения экспедиционных работ наблюдалось повышенное цветение водорослей в поверхностном слое моря. Повышенное содержание клеток водорослей нашло свое отражение в данных обратного акустического рассеяния ADCP (рис. 44). Область повышенного акустического рассеивания располагалась на глубинах 0-20 м.



Рис. 44. Пример картины распределения обратного акустического рассеивания на разрезе Таран-Норд-Вест 30.07.2016

Измерения параметра общей мутности вод на океанографических станциях показало, что существенного увеличения мутности вод в районе экспедиционных работ не наблюдалось (рис. 45).



Рис. 45. Пример вертикального распределения общей мутности вод в прибрежной зоне Балтийского моря во время экспедиционных работ

24 июля 2016 года был запущен первый лагранжевый буй в точке с координатами 55°04,523 с.ш. 19°45,570 в.д. К сожалению, из-за несовершенства конструкции и слабого GSM сигнала в относительно удаленном от берега районе, буй смог отправить только 3

SMS-сообщения со своим положением и далее не выходил на связь. 4 августа буй был случайно найден на побережье в районе поселка Янтарный, Калининградская область. Однако он сильно пострадал в ходе дрейфа – восстановить данные с внутренней карты памяти не удалось. Но судя по его дрейфу можно установить, что вдоль береговое течение было направлено на юг.

Второй модифицированный лагранжевый буй был запущен 28 июля 2016 года в точке с координатами 55°00,967 с.ш., 19°52,120 в.д. Буй был запущен существенно ближе к берегу, по сравнению с первым буем. В начале своего дрейфа буй отправлял SMSсообщения непостоянно, однако при приближении к берегу сообщения стали приходить регулярно, раз в полчаса (рис. 46). За время дрейфа буй совершил сложные колебательные движения, схожие с инерционными колебания. По данным ADCP поверхностные течения в период дрейфа буя магнитуда течения составляла примерно 20 см/с. Данная скорость была принята за среднюю скорость движения буя. По оценке пройденного расстояния удалось восстановить, что в случае линейного соединения точек, когда буй отправлял информацию о своем местоположении, он должен был бы пройти расстояние в 20 раз больше, чем в действительности. Данный расчет позволяет сделать вывод, что неизвестные части дрейфа скорее всего также заполнены сложными инерционными колебаниями. Примечательно, что за время дрейфа буй несколько раз кардинально менял направление дрейфа. На дальней западной точке дрейфа буй совершил разворот на 180 градусов и стал двигаться на восток, постепенно приближаясь к берегу и в районе поселка Янтарный сел на мель, где и был пойман.

Проведено сравнение данных натурных измерений с результатами спутникового дистанционного зондирования. Было выявлено, в частности, в районе дрейфа дрифтера находился вихревой диполь, который мог существенно повлиять на его движение. На рис. 47а представлен фрагмент изображения MODIS Aqua от 27 июля 2016 г., на котором стрелкой отмечен вихревой диполь, квадрат отмечает положение траектории дрифтера за период 30-31 июля 2016 г. Запущенный 28 июля в районе м. Таран дрифтер был вынесен в Гданьский залив (до 30 июля с ним была потеряна связь), 30-31 июля его траектория представляла собой трохоиду, или как еще называют такую кривую удлиненную циклоиду (рис. 476).



Рис. 46. Дрейф лангранжевого дрифтера в период с 28 июля 2016 г. по 4 августа 2016 г.



Рис. 47. Дрейф буя в зоне влияния вихревого диполя: (а) проявление вихревого диполя (отмечено стрелкой) на цветосинтезированном изображении MODIS Aqua от 27июля 2016 г.; квадрат отмечает положение траектории дрифтера за период 30-31 июля 2016 г.; (б) увеличенное изображение траектории движения дрифтера. Стрелками отмечено направление движения (Лаврова, Сабинин, 2016)

Анализ результатов экспериментов с лагранжевыми буями показал сложность динамических процессов, происходящих в прибрежной зоне Балтийского моря. Несмотря на то, что течения слабые, под влиянием вихревых процессов буи (а соответственно и загрязнения) могут распространяться: а) на большие расстояния; б) в направлении,

которое нельзя объяснить только влиянием ветра или постоянных течений. Планируется в дальнейшем совместное использование данные о течениях, полученных при помощи ADCP и при помощи лагранжевых буев для валидации численных моделей распространения поверхностных загрязнений в акватории моря.

Экспедиционные работы на Черном море в сентябре-октябре 2015 г.

Подспутниковые измерения в Черном море проводились в период с 09 сентября по 7 октября 2015 г. на базе Южного отделения ИО РАН им. П.П. Ширшова. Было выполнено 14 выходов в море на маломерной яхте "Вита". В таблице 5 представлен график морских работ. На рис. 48 представлена общая схема полигона. Во время выходов в море осуществлялась гидрофизическая съемка толщи вод при помощи: акустического профилографа ADCP WorkHorse Sentinel 300 кHz, которой был жестко закреплен к борту яхты, так же с другого борта была закреплена ручная лебедка с СTD зондом фирмы RBR для измерения температуры воды, электропроводности, скорости звука, давления и мутности водной толщи.

N⁰	Дата	Время выхода	Район работ	Станции	Комментарии
1	09.09	13:30-17:00	Пробный выход до свала глубин	5 станций	
2	10.09	10:58-15:15	От Голубой бухты до маяка	9 станций	
3	11.09	10:20-14:20	До границы Геленджикской бухты	9 станций	
4	12.09	10:55-14:00	Работы на выходе из Геленджикской бухты	8 станций	
5	14.09	11:08-14:40	До Тонкого мыса	6 станций	
6	15.09	10:41-15:00	До маяка	9 станций	
7	16.09	10:17-18:00	На Ашамбе до Дивноморска	ADCP+CTD	
8	17.09	Работы на Ашамбе, только ADCP			
10	21.09	Ашамба только СТЛ			
11	22.09	10:30-18:00	4 галса под АДСР	25 станций	
12	23.09	9:34-13:30	2 галса	12 станций	
13	24.09	11:30-18:00	3 галса	18 станций	
14	27.09		1 и 2 галсы 2 раза (полигон)	24 станций	
15	29.09	10:04-15:00	До маяка,	9 станций	Сильные
					загрязнения
					морской
16	01.10	0.00.10.00			поверхности!!!
16	01.10	9:20-12:00	До маяка	8 станций	
17	04.10	9:34-15:00	3 галса ADCP+CTD	19 станций	
18	07.10	6:15-12:00	Работы у Толстого	16 станций +	Проявления

Таблица 5. График морских работ в 2015 г.

	мыса	термистерная	внутренних волн
		цепочка	



Рис.48. Схема района экспедиционных работ в 2015 г.

Все выходы проводились согласно представленной выше схеме, на траверзе Голубой и Геленджикской бухт до свала глубин и в рамках шельфовой зоны. Маршрут работ корректировался в зависимости от динамической ситуации на полигоне. На разрезе от свала глубин до маяка на Толстом мысе проводились зондирования толщи вод на стандартных горизонтах (65м, 55м, 45м, 35м, 25м). Так же измерения проводились на трех реперных станциях – основных источниках загрязнений: около трубы глубоководного выпуска сточных вод города Геленджика, около строящегося причала в районе аэропорта и на входе в Голубую бухту. Отдельные специальные работы проводились по краю Геленджикской бухты, чтобы исследовать вынос вод из нее.

Район экспедиционных работ известен большой изменчивостью течений. Регулярно в осенний период наблюдаются противотечения (направление противоположное Основному черноморскому течению), что зачастую свидетельствует о прохождении антициклонических вихрей. Пример измеренных с помощью ADCP противотечений приведен на рис. 49.



Рис. 49. Направление и скорость течений по данным ADCP 09.09.15. Течение направлено на юго-восток, в сторону Геленджика

На картах обратного рассеяния акустического сигнала ADCP было выявлено не только положение термоклина, который располагался на глубине от 15 до 30 м в период проведения работ, но и наличие мутных вод, например на траверзе Геленджикской бухты (рис. 50).



Рис. 50. Контур обратного рассеяния по данным АДСР 10.09.15.

На рис. 50 следует отметить область повышенного рассеяния от поверхности до дна (схематично обведено в красный кружок), измеренную в момент проведения измерений вдоль Геленджикской бухты. Так как направление потока в этом районе от Геленджика, было сделано предположение, что природа этого повышенного рассеяния - вынос антропогенно-загрязненных вод из Геленджикской бухты. Измерения на траверзе Геленджикской бухты проводились регулярно, и постоянно фиксировалось повышение обратного рассеяния акустического сигнала.

20 и 21 сентября 2015 были получены радиолокационные изображения (РЛИ) SAR-C Sentinel-1А. На изображении от 20 сентября проявились вихревые структуры, которые находились на расстоянии, недоступном для измерений с яхты (рис. 51). 21 сентября проводился искусственный разлив масла под пролет спутника с целью выявить влияние вихревых структур на распространение пленочных загрязнений (рис. 52). Синим отмечена траектория судна, красным – район искусственного разлива. Разлив производился и по краям синей траектории. К сожалению, пленочные загрязнения попали в штилевую область и не видны на изображении. Многочисленные сликовые полосы, наблюдаемые на РЛИ, выстроены вдоль течения.

Вторая часть экспедиционных работ началась 22 сентября. Морские измерения проводились одновременно с двух судов - на одном был закреплен ADCP, другое судно по тем же галсам выполняло гидрологическую съемку при помощи CTD-зонда. Схема работ представлена на рис. 53. Наиболее интересные результаты были получены 22 сентября с точки зрения динамической ситуации в изучаемом полигоне. В районе Геленджикской бухты при помощи ADCP была зафиксирована мелкомасштабная вихревая структура - антициклонический вихрь, радиус которого составлял порядка 5 км (рис. 54).



Рис. 51. Проявления вихревых структур на РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 20 .09.15, полученном в районе проведения экспедиционных работ



Рис. 52. РЛИ SAR-C Sentinel-1А от 21.09.15. Синяя линия – траектория судна, красная – вдоль которой производился искусственный разлив



Рис. 53. Схема движения судна по полигону во время гидрологической съемки



Рис. 54. Проявление антициклонического вихря в данных АДСР от 22.09.15 г.

На рис. 55 продемонстрирована карта пространственного распределения температуры в приповерхностном слое. На ней фиксируется язык с более теплыми водами и станции с более холодными водами. Эта ситуация характерна для антициклонических вихрей, когда в его центре происходит подъем более холодных глубинных вод обогащенных минеральными веществами.



Рис. 55. Пространственное распределение температуры воды, солености и мутности на приповерхностном горизонте 0,7 метров за 22.09.15

Один из постоянных объектов мониторинга – район Толстого мыса, где в море уходит труба с очистных сооружений. По техническим нормам сброс сточных вод должен производиться по глубоководному выпуску, оголовок которого должен находиться на расстоянии более 2 км от берега на глубине около30 м. Из-за неисправности трубы и аварийных сбросов неочищенная или плохо очищенная вода попадает в море вблизи берега. Учитывая характер прибрежных течений, можно ожидать распространение загрязнений как вдоль берега, так и в саму Геленджикскую бухту. В 2015 г., как и в предыдущие годы нами проводились измерения течений и параметры воды (термохалинной структуры и мутности) в районе трубы. 7 октября 2015 г. в районе трубы была поставлена термистерная цепочка датчиков Starmon mini. Термистерная коса вела непрерывные измерения в точке около 8 часов: с 7 до 15 часов. Термистерная цепочка состояла из 10 датчиков, закрепленных на разных горизонтах, представляющих наибольший интерес. Визуализация полученных данных представлена на рис. 56, 57. Частота измерений позволила нам зафиксировать короткопериодные внутренние волны характерное явление для шельфовой зоны Черного моря. Для района Геленджика характерные частоты внутренних волн - 4-10 цикл/ч, что соответствует периодам волн диапазона 6-15 мин. Именно такие результаты были получены 7 октября. Внутренние волны в районе сточной трубы могут способствовать переносу сточных вод с глубины практически на поверхность.



Рис. 56. Временной график распределения температуры воды по данным термистерной цепочки за 7 октября 2015 г.



Рис. 57. Увеличенные фрагменты временного графика распределения температуры воды по данным термистерной цепочки для 1-го участка (сверху) и для 2-го участка, где проявляются короткопериодные внутренние волны 7 октября 2015 г.

Экспедиционные работы на Черном море в сентябре 2016 г.

Подспутниковые измерения на Черном море проводились в период с 09 по 17 сентября 2016 г. на базе Южного отделения ИО РАН им. П.П. Ширшова. Было выполнено 6 выходов в море на маломерной яхте "Вита". В таблице 6 представлен график морских работ. Полигон работ и набор океанологического оборудования были идентичны тому, что было в 2015 г. Дополнительно использовалось, приобретенное за счет гранта оборудование - Hemisphere Vector V102 GPS Compass, которое позволяет выполнять измерения на больших глубинах

Одной из основных задач в этой экспедиции стала верификация спутникового изображения MSI Sentinel-2A, полученного 13.09.16. Его фрагмент и наложенная поверх запись ADCP со средними течения от поверхности до дна, представлена на рис. 58. Области повышенный цветности, выделенные черными окружностями, представляли

наибольший интерес. А именно: Голубая бухта, район строящегося порта, Геленджикская бухта, район над трубой очистительного сооружения г. Геленджик, вихревая структура в поле цветности. Для анализа данного спутникового изображения были использованы данные подпустниковых измерений 13 и 14 сентября.



Рис. 58. Фрагмент цветосинтезированного изображения MSI Sentinel-2A за 13.09.16. Желтые стрелки - среднее направление течения по данным ADCP за 14.09.16

Схема гидрологических работ, выполненная 13 сентября, представлена на рис. 59. Была выполнена: съемка над трубой очистительного сооружения, съемка на выходе из Геленджикской бухты и стандартный поперечный разрез от кромки шельфа до маяка (Толстый мыс). Графически результаты представлены на рис. 60 и 61.

Во время выполнения работ над трубой очистительного сооружения г. Геленджик, визуально были идентифицированы воды отличные по цветности, с большим количеством взвешенного вещества (см. рис. 59 - фотография в правом углу). Особое внимание было уделено анализу данных станций над трубой: в самом "пятне загрязненных вод" и вне его. Как показал анализ данных измерений in-situ, выявленные на спутниковом изображении структуры повышенной цветности не проявились ни в данных датчика мутности, ни в обратном рассеянном акустическом сигнале ADCP.



Рис. 59. Схема гидрологических измерений за 13.09.16. Оранжевым овалом отмечен район измерений





Рис. 60. Гидрологическая структура шельфовых вод в разрезе (поле температуры, солености и мутности вод) и фрагмент записи ADCP в поле обратного рассеяния за 13 сентября 2016





Рис. 61. Графики распределения гидрофизических полей в районе, где расположена труба очистительных сооружений г. Геленджик за 13 сентября 2016 (цифрами указан номер станции)

14 сентября, опираясь на полученное спутниковое изображение, план работ был выстроен так, чтобы выполнить съемку ADCP поперек шельфа по вытянутому маршруту, с целью "захватить" вихревую структуру. Дополнительно было выполнено 5 гидрологических станций. Схема работ за 14 сентября представлена на рисунке 62.



Рис. 62. Схема гидрологических измерений 14.09.16



Рис. 63. Графики распределения гидрофизических полей за 14 сентября 2016 (цифрами указан номер станции)

В силу большой неустойчивости мелкомасшатбных вихревых процессов, никаких динамических структур 14 сентября зафиксировать не удалось. Преобладающее направление течение было направлено в сторону Геленджикской бухты, т.е. являлось противотечением для ОЧТ, с малыми скоростями потока, не превышающими 0,35 м/с (рис.63).

Анализ данных, полученных на 5-ти станциях, расположенных в разных районах полигона, не выявил сильных различий в относительных характеристиках гидрологических полей.

Источником мутности вод мог быть как сброс сточных вод из очистительного сооружения г. Геленджик, так и обильное цветение фитопланктона вблизи береговой линии. Основным нерешенным вопросом остается: как оценить количественно различия в гидрологических характеристиках "загрязненных вод" и "чистых вод открытой воды"? Какие методы и океанологические приборы использовать? Возможно, выявленные на спутниковом изображении вихревых структуры являются квази-двумерными, т.е. распространяются только в тонком приповерхностном слое. Измерения имеющимися у нас приборами начинаются с 2 м. Вопрос остается открытым и будет решаться в ходе будущих экспедиций.

Результаты проведенных в 2016 г. исследований были опубликованы в 11 статьях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, в одной монографии Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. «Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий», изданной в ИКИ РАН, получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Интерфейс программирования приложений (API) для ведения и доступа к базе знаний о процессах и явлениях, наблюдаемых в Мировом океане». Участники проекта представили 15 докладов по результатам работ в рамках 7 международных научных мероприятий, 8 докладов на Четырнадцатой Всесоюзной открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ, г. Москва) и 4 доклада в рамках Седьмой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (ИКИ, г. Таруса).

Статья Mityagina, M., Lavrova, O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. 8(10). 875; doi:10.3390/rs8100875, опубликована в журнале, импакт-фактор которого составляет 3.036;

статья Lavrova Olga; Krayushkin Evgeny; Golenko Maria; Golenko Nikolay. Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, Vol. 9, Issue 9, DOI 10.1109/JSTARS.2016.2580602, опубликована в журнале с импакт-фактором 2.145.

[Булычева и др., 2016]. Булычева Е.В., Костяной А.Г., Крек А.В. Межгодовая изменчивость нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики в

2004–2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 74–84.

[Лаврова и др., 2016]. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. Москва: ИКИ РАН, 2016, 315 с.

[Лаврова, Сабинин, 2016]. Лаврова О.Ю., Сабинин К.Д. Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60-73.

[Lavrova et al. 2016a]. Lavrova Olga Yu., Soloviev Dmitry M., Strochkov Mikhail A., Bocharova Tatiana Yu., Kashnitsky Alexandr V. River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016, edited by Charles R. Bostater, Xavier Neyt, Caroline Nichol, Oscar Aldred, Proc. of SPIE Vol. 9999, 99990G, doi: 10.1117/12.2241312.

[Lavrova et al. 2016b]. Lavrova Olga Y., Mityagina Marina I., Bocharova Tatiana Y., Strochkov Alexey Y. Assessing the ecological state of the Barents and Kara Seas from satellite remote sensing data // Abstract book SPIE Remote Sensing Symposium 2016, 26-29 September, 2016, Edinburgh, United Kingdom, 9999-34, <u>www.spie.org/rs</u>.

[Lavrova et al., 2016 c]. Lavrova Olga; Krayushkin Evgeny; Golenko Maria; Golenko Nikolay. Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, Vol. 9, Issue 9, DOI 10.1109/JSTARS.2016.2580602, Jun 29 2016.

[Lavrova et al., 2016 d]. Lavrova, Olga Yu.; Mityagina, Marina I.; Bocharova, Tatiana Yu.; Kostianoy, Andrey G. Determining zones of persistent ecological risk in the Baltic Sea // Abstract book Living Planet Symposium 2016, 09 – 13 May, 2016, Prague, Czech Republic, OCEA-89, <u>http://lps16.esa.int</u>.

[Lebedev, 2016]. Lebedev S. Investigation Seasonal and Interannual Variability of the Caspian Sea Dynamics Based on Satellite Altimetry Data // Proceedings Living Planet Symposium 2016. Czech Republik, Prague, 9–13 May 2016 / Ed. L. Ouwehand. Noordwijk: ESA Publications Division. 2016. SP-740. ISBN 978-92-9221-305-3. ISSN 1609-042X. 7 p.

[Mityagina, Lavrova, 2016 a]. Mityagina, M., Lavrova, O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. 8(10). 875; doi:10.3390/rs8100875.

[Mityagina, Lavrova 2016 b]. Mityagina Marina I.; Lavrova Olga Yu. Results of the Caspian Sea satellite survey: internal wave climate // Proc. SPIE 9999, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016, 99991B; doi:10.1117/12.2241656.