Основные результаты, полученные в 2018 г. в ходе исполнения второго этапа работ по проекту «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации» (Проект 2017)

1. Налажено получение и интегрирование в информационную систему (геопортал) "See The Sea" (STS) в автоматическом режиме новых спутниковых данных для тестовых районов.

В 2018 году было отлажено поступление в автоматическом режиме спутниковых данных в архивы Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг", что обеспечило интеграцию оперативно обновляемых данных в информационную систему "See the Sea". В частности, производилось пополнение архивов данных, полученных следующими спутниковыми системами:

• радиолокаторами с синтезированной апертурой (PCA) SAR-C Sentinel-1A;1-B;

• многоспектральным сенсором оптического диапазона MSI (the Multi Spectral Instrument) Sentinel -2A, Sentinel -2B;

- радиометром SLSTR (Sea and Land Surface temperature radiometer) Sentinel-3A;
- спектрометром OLCI (Ocean and Land Color Instrument) Sentinel -3A;
- сканирующими радиометрами ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8;
- спектрорадиометрами MODIS Terra/Aqua.

Объем архива спутниковых данных приближается к 2 петабайтам.

Имевшийся ранее опыт получения данных со спутника Sentinel-3А позволил подготовить инфраструктуру обработки данных ЦКП "ИКИ-Мониторинг" для приема данных приборов SLSTR и OLCI со спутника Sentinel-3B, запущенного в 2018 году. Анализ технических характеристик показал, что введение в эксплуатацию второго спутника серии Sentinel-3 способно обеспечить полное ежедневное покрытие тестовых районов данными, включая расположенные в сравнительно низких широтах Черное и Каспийское море.

В качестве основных **тестовых районов** на 2018 г. выбраны: участок акватории Черного моря вблизи дельты р. Дунай; северо-восточная, восточная и юго-восточная части Черного моря; Средний и Южный Каспий; юго-восточная часть Балтийского моря.

2. Создан новый и усовершенствован имеющийся инструментарий информационного сервиса STS для эффективной работы с данными спутниковых сенсоров нового поколения, в целях решения поставленных в проекте задач.

В течение отчетного периода было усовершенствовано программное обеспечение геопортала STS для эффективной работы с данными современных спутниковых систем. В частности, реализована возможность получения специализированных продуктов обработки данных для анализа состояния водной поверхности. Был разработан инструментарий для получения и отображения в геопортале STS значений индекса плавающих водорослей (Floating Algae Index, FAI). FAI представляет собой новый способ обнаружения водорослей на поверхности водоемов, обладающий устойчивостью к

влиянию полупрозрачной облачности (Рис.1). Подготовка FAI производится на основе данных приборов MSI, OLI-TIRS и MODIS.



Рис. 1. Цветение водорослей в Балтийском море. Пример отображения индекса FAI в STS

Усовершенствована возможность получения и отображения в STS карт температуры поверхности воды (Sea Surface Temperature, SST) на основе данных TIRS ИСЗ Landsat-8.

Реализован цветовой синтез радиолокационных изображений, основанный на визуализации данных, полученных в режимах горизонтальной и вертикальной поляризаций, а также их отношения.

Расширены возможности анализа метеорологических данных. Добавлен инструментарий построения изолинейных карт различных показателей, а также производных величин, в том числе, накоплений с начала года, средних многолетних величин и отклонений текущих значений от средних многолетних величин. При анализе временных рядов добавлена возможность сглаживания методом скользящего окна.

3. Усовершенствованы методики надёжного распознавания и дискриминации различных типов загрязнения морской среды, а также получения их уточнённых количественных параметров на основе комплексного использования новых типов данных дистанционного зондирования, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра

Усовершенствованы методики надёжного распознавания и дискриминации различных типов загрязнения морской среды, которые основываются на комплексном использовании новых типов данных дистанционного зондирования, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра: многоспектрального сенсора MSI ИСЗ Sentinel-2 и спектрометра OLCI ИСЗ Sentinel-3 и данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA), установленных на ИСЗ SAR-C Sentinel-1A, -1B. Определены преимущества и возможные ограничения использования различных спутниковых данных и их комбинаций для выявления пленок различной природы на морской поверхности, а также на развитие методик разрешения неоднозначности в интерпретации радиолокационных данных и уточнения количественных параметров нефтяного загрязнения морской поверхности.

Разработана методика оценки границ достоверности определения площади нефтяного загрязнения по радиолокационным данным, основанная на учете зависимости формирования радиолокационных сигнатур нефтесодержащих пленок на морской поверхности от волно-ветровой и гидрометеорологической обстановки.

Усовершенствована методика различения загрязнений в прибрежной зоне, вызванных повышением концентрации взвешенного вещества, от биогенных продуктов в зонах интенсивного цветения фитопланктона на основе совместного анализа карт общего содержания взвешенного вещества и концентрации хлорофилла-а по данным MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8 и OLCI Sentinel-3.

4. Получены статистически обоснованных данные о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости динамических процессов, влияющих на перенос загрязнений в тестовых районах на основе спутниковых изображений

Как было показано в ходе исполнения Проекта 2014 и подтверждено новыми исследованиями, выполненными в ходе настоящего Проекта, к основным динамическим процессам, которые влияют на перенос загрязнений, относятся процессы, связанные с распространением В море речных вод, гидрологических фронтов, мезо-И субмезомасштабные вихревые процессы и внутренние волны, которые также потенциально могут влиять на перенос (по глубине) загрязнений различной природы. В 2018 г. был проведен статистический анализ спутниковых изображений с целью определения пространственной и временной изменчивости проявлений перечисленных процессов в различных тестовых районах. Ниже приведены наиболее интересные результаты статистических исследований.

4.1. Статистические исследования пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости мезо- и субмезомасштабных вихревых структур

Одной из задач проекта являлось проведение исследования пространственной и временной изменчивости мезо- и субмезомасштабных вихревых структур в юговосточной части Балтийского моря за летний период 2014-2018 гг. Данный период был

выбран исходя из того, что с 2014 г. в данном районе были начаты наши подспутниковые измерения. В 2018 г. был проведен статистический анализ частоты встречаемости, отличительных особенностей и локализации поверхностных проявлений вихревых структур в исследуемом районе помесячно с мая по сентябрь. Данный период был выбран исходя из наличия трассеров, позволяющих идентифицировать вихревые структуры как на радиолокационных, так и на цветосинтезированных (True color) спутниковых изображениях. Были проанализированы все доступные данные сенсоров, работающих в оптическом диапазоне с высоким пространственным разрешением: Landsat-8 OLI, Sentinel-2A MSI, Sentinel-2B MSI. Выборка охватывала временной ряд с начала мая по конец сентября по каждому году, начиная с 2014 и заканчивая 2018 г. Были проанализированы также данные спутниковой радиолокации Sentinel-1A SAR-C, Sentinel-1В SAR-С. Выборка охватывала временной ряд с начала мая по конец сентября по каждому году, начиная с 2015 и заканчивая 2018 годом. Временные периоды, за которые использовались различные данные, показаны на графиках (рис. 2, 3). Временные периоды определялись введением в штатный режим различных приборов и доступность их данных для научных исследований. Всего было проанализировано 272 изображения высокого разрешения в оптическом диапазоне и 333 радиолокационных изображения. Постепенное увеличение количества спутниковых изображений помесячно связано с постепенным вводом в эксплуатацию новых спутниковых систем.

По результатам проведенного исследования в данных разных сенсоров была определена частота встречаемости поверхностных проявлений вихревых структур в акватории моря в данных разных сенсоров. В данных видимого диапазона вихревые структуры проявляются из-за рассеивания света на гидрозолях, фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах. 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 пространственно-временной непосредственно использоваться для исследования изменчивости поверхностного слоя, в частности, мезомасштабной динамики вод. Статистический анализ спутниковых изображений в оптическом диапазоне, результаты которого приведены на рис. 2 показал, что из-за особенностей гидрометеорологических условий, в первую очередь из-за обильного облачного покрова над акваторией Балтийского моря, в среднем лишь 50% получаемых спутниковых изображений в видимом диапазоне пригодны для анализа и позволяют идентифицировать водную поверхность. отдельные неблагоприятные процент информативных В месяцы спутниковых изображений уменьшается до 10-20%. В то же время, практически все информативные (полученные при безоблачных или малооблачных условиях) изображения содержат проявления вихревых структур. В среднем только 10% информативных спутниковых изображений в видимом диапазоне не содержат проявлений вихревых структур, причем этот параметр остается практически постоянным на всей выборке. Полученный результат свидетельствует о том, что вихревые структуры формируются в юго-восточной части Балтийского моря постоянно. Это вызвано как завихренностью ветрового поля, так и особенностями береговой линии, в частности наличием полузамкнутого Гданьского залива, в данном районе.



Рис.2. Результаты статистического анализа спутниковых изображений в оптическом диапазоне. Величина каждого столбца – общее количество спутниковых изображений за выбранный месяц, величина белого столбца – количество спутниковых изображений, по которым невозможно идентифицировать водную поверхность из-за обильной облачности, величина голубого столбца – количество спутниковых изображений, по которым возможно идентифицировать поверхность акватории, величина заштрихованной части голубого столбца – количество спутниковых изображений, на которых встречаются проявления вихревых структур. Значение в процентах над каждым столбцом дает отношение количества изображений с проявлениями вихревых структур к общему количеству спутниковых изображений

По результатам проведенного исследования была определена частота встречаемости поверхностных проявлений вихревых структур в акватории моря в поле рассеивания радиолокационного сигнала из-за присутствия поверхностно-активных биогенных пленок на поверхности моря, концентрируемых в районах образования вихревых структур. На рис. 3 представлена общая диаграмма полученных результатов.



Рис. 3. Результаты статистического анализа спутниковых изображений в радиолокационном диапазоне. Величина каждого столбца – общее количество спутниковых изображений за выбранный месяц, величина голубого столбца – количество изображений, на которых встречаются проявления вихревых структур. Значение в процентах над каждым столбцом дает отношение количества изображений с проявлениями вихревых структур к общему количеству спутниковых изображений

Ввиду прозрачности облачного покрова для радиолокационного сигнала все полученные спутниковые изображения были доступны для анализа. Однако, как показали результаты исследования, частота встречаемости поверхностных проявлений вихревых структур на поверхности моря по данным радиолокационных спутниковых изображений существенно ниже, нежели на спутниковых изображениях в оптическом диапазоне, в среднем соотношение изображений с проявлениями вихревых структур к общему количеству изображений не превышает 20%. Подобная картина объясняется несколькими причинами: во-первых, биогенные плёнки, формируемые в областях конвергенции в вихревых структурах, неустойчивы к ветровому воздействию и разрушаются при средней скорости ветра более 6 м/с. Анализ метеорологической информации, в частности информации о поле ветра, показал, что средняя скорость ветра достаточно часто превышает 6 м/с, особенно в открытой части моря. Во-вторых, как показывают наши натурные измерения, максимум концентрации гидрозолей, как правило фитопланктона, располагается не касмой поверхности моря, а несколько глубже, тем самым, не

формируя пленку на поверхности, за счет которой и проявляются вихревые структуры на радиолокационных изображениях.

С целью выявления пространственной изменчивости проявлений вихревых структур был проанализирован массив спутниковых изображений в оптическом и радиолокационном диапазонах электромагнитного спектра, содержащих эти проявления. Особое внимание было уделено юго-восточной части Балтийского моря, в северовосточной, восточной и западной частях Черного моря, где антропогенные загрязнения, связанные со сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты, наблюдаются достаточно часто. Были выделены основные районы локализации вихревых структур в этих районах, и оценивалась степень устойчивости наблюдаемых вихревых структур во времени. В частности, было выявлено, что основным районом формирования и развития вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря является открытая часть Гданьского залива. Как правило, наблюдаемые в данном районе вихревые процессы формируются за счет атмосферного воздействия и могут быть очень устойчивыми во времени. На рис. 4 показаны последовательные контуры устойчивого вихревого образования, наблюдаемого в мае 2018 года в открытой части Гданьского залива. Представленный вихревая структура наблюдалась в течение не менее 11 суток на серии спутниковых изображений в оптическом диапазоне. При этом центр вращения двигался со средней скоростью не более 0.6 см/с.



Рис. 4. Временная изменчивость контура вихревоой структуры в открытой части Гданьского залива по данным спутниковых изображений в оптическом диапазоне

Второй район активного формирования вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря – акватория в районе мыса Таран. Вихревые образования формируются в данном районе за счет обтекания прибрежным течением мыса. В результате спутникового мониторинга и проведения подспутниковых экспедиционных работ было показано, что вихревые образования, чаще всего антициклонической завихренности, в данном районе неустойчивы. Возможно образование в данном районе более

«долгоживущих» вихревых диполей, один из которых удалось пронаблюдать на спутниковых изображениях, полученных в течение 3 дней в августе 2018 г., и определить некоторые из его параметров во время проведения наших подспутниковых измерений.

4.2. Статистические исследования пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости проявлений внутренних волн

Проведены статистические исследования проявлений внутренних волн в морях без приливов – Каспийском, Черном, Балтийском; и в приливном Средиземном море, в Лионском заливе. Анализ спутниковых данных показал, что использование спутниковых данных видимого диапазона высокого пространственного разрешения, в частности данных MSI Sentinel-2, разрешение которых составляет 10 м, позволяет идентифицировать внутренние волны, которые иногда не имеют проявлений на синхронных радиолокационных изображениях. Ранее в наших исследованиях проявлений внутренних волн упор делался на анализе в первую очередь радиолокационных изображений. Использование данных видимого диапазона позволяет получать статистически более обоснованные данные о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости проявлений внутренних волн.

Приведем статистические данные о межгодовой изменчивости проявлений внутренних волн в северо-восточной части Черного моря, где это явление достаточно редкое, по сравнению с другими основными районами проявлений внутренних волн в Черном море (вблизи Крымского полуострова и в районе дельты Дуная). За период наблюдений 2005 – 2016 гг. на спутниковых изображениях акватории Черного моря от Керченского пролива до Туапсе было выявлено всего 17 случаев таких проявлений, причем 6 из них приходилось на 2006 г. (*рис. 4*). Увеличение числа проявлений внутренних волн в 2006 г. объясняется резким и неглубоким пикноклином, сформировавшимся, как показали измерения in-situ, в начале июня 2006 г.



Рис. 4. Количество проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях 2005-2017 гг. в северо-восточной части Черного моря

Анализ спутниковых изображений, полученных в летний период 2017 г., позволил выявить наличие аномально большого количества проявлений цугов внутренних волн в

июле 2017г. (*рис. 4*). Практически на каждом спутниковом изображении данной акватории, полученном в летний период, как радиолокационном, так и полученном в видимом диапазоне, идентифицированы либо одиночные цуги, либо целая система цугов внутренних волн. Оценить количество цугов из-за их многочисленности не представляется возможным, поэтому в 2017 г. учет производился по количеству изображений, содержащих поверхностные проявления внутренних волн. С 30 июня по 24 июля 2017 таких изображений составило 17 штук. Такая аномалия в количестве проявлений внутренних волн может быть объяснена так же, как и в 2006 г. формированием резкого и мелкого слоя скачка в конце июня, в результате резкого потепления после относительно продолжительной холодной погоды в июне.

На рис. 5 представлена карта-схема поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях в северо-восточной части Черного моря за 2005-2017 гг. Красными черточками отмечены проявления внутренних волн, выявленные в июле 2017 г. (даты не нанесены в целях лучшего восприятия рисунка). Всего было выявлено 17 случаев, 11 из них юго-восточнее керченского предпроливья над глубинами 100 – 200 м. В этом районе цуги распространялись преимущественно к берегу и были «привязаны» к неоднородностям дна. В других районах одиночные ЦУГИ распространялись преимущественно в восточном направлении параллельно берегу. Были оценены пространственные характеристики внутренних волн: максимальная длина волны в цуге составляла в среднем 250 – 300 м; протяженность переднего фронта от 6 до 20 км, число волн в цуге – от 5 до 15.

4.3. Статистические исследования пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости проявлений речных плюмов

Продолжена работа по накоплению статистики сезонной и межгодовой изменчивости и пространственного распределения речных выносов в тестовых районах. Исследования проводились в информационной системе STS с использованием усовершенствованного инструментария «классификация с обучением» (рис.6). В качестве исходных данных использовались данные видимого диапазона сенсоров MSI Sentinel-2A, -2B и OLI Landsat-8. Выделялись области максимального содержания взвешенного вещества и области максимального распространения речных вод. Оценивались их площади.

В результате статистических исследований сезонной и межгодовой изменчивости плюма р. Рона (Лионский залив Средиземного моря) выявлено аномальное распространение речных вод в заливе в феврале 2018 г. Видимая на изображении MSI Sentinel-2 от 4 февраля 2018 г. часть плюма составила 2466 кв.км. Аномальными по сравнению с предыдущими годами (2001-2017) являлись и значения полного содержания взвешенного вещества. Возможным объяснением может служить изменение ветровой ситуации в регионе, в частности усилением северного ветра Мистраль в конце января - феврале 2018 г.



Рис. 5. Карта-схема проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях в 2005-2017 гг. Красным отмечены проявления, выявленные в июле 2017 г.



Рис.6. Результат классификации различных типов вод в выносе р. Рона на основе изображения OLI Landsat-8, полученного 17 января 2018 г. Красным выделяется область с резко повышенным содержанием взвешенного вещества. Яркие белые точки свидетельствуют о штормовых условиях с обрушением вод

4.4. Статистические исследования мезо- и субмезомасштабных фронтов в юговосточной Балтике

Накоплена статистика о сезонной изменчивости и пространственном распределении мезои субмезомасштабных фронтов (как в море, так и в приводном слое атмосферы), выявленных по данным спутниковой радиолокации для тестового района юго-восточной Балтики (рис. 7). Выделены признаки, позволяющие разделять радиолокационные сигнатуры фронтов по их принадлежности к процессам в море или в приводном слое атмосферы.



Рис. 7. Схема поверхностных проявлений фронтов различной природы, выявленных на РЛИ морской поверхности юго-восточной части Балтийского моря летом 2017 г.

5. Проведены модельные расчёты, направленные на выявление механизмов влияния процессов малых масштабов на распространение загрязнений в тестовых районах: восточная и юго-восточная части Черного моря, юго-восточная часть Балтийского моря, Лионский залив Средиземного моря.

Наиболее интересные результаты были получены для юго-восточной части Балтийского моря и юго-восточной части Черного моря.

5.1 Результаты модельных расчетов для юго-восточной части Балтийского моря

На основе оперативной интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI) проводилось численное моделирование дрейфа 4 буев, выпущенных 3, 4, 7 и 8 августа 2018 северо-восточнее Самбийского полуострова для исследования влияния процессов малых масштабов на распространение загрязнений. Были определены скорости и направления движения буев с временным шагом 15 мин. Сравнение характеристик дрейфа буев, полученных в ходе экспериментальных работ в море и в результате численного моделирования, позволили провести валидацию модели Seatrack Web для района вокруг Самбийского полуострова, что чрезвычайно важно для оценки рисков нефтяного загрязнения вод и побережья

Калининградской области. Сравнение результатов показало, что модель очень хорошо воспроизводит дрейф буев, при этом в модели ветровой фактор должен задаваться 0%, что позволяет наиболее точно воспроизводить дрейф буев и даже район (координаты) касания берега в случае их выброса на сушу.

Кроме того, для периода с 26 октября по 16 ноября 2018 года проводилось ежедневное моделирование дрейфа потенциального нефтяного загрязнения (смазочное масло, 10 м³), выпущенного из района 54.99 - 55.08° с.ш., 19.85 - 20.04° в.д. в период с 26 октября по 16 ноября 2018 года. Траектории движения потенциальных нефтяных пятен показали, что они существенно подвержены влиянию мезомасштабных и мелкомасштабных динамических процессов, обусловленных присутствием соответствующих вихрей, диполей, струй и меандров прибрежного течения.

Проведенное численное моделирование дрейфа нефтяного пятна в условиях реальных полей ветра и течений позволяет выполнить оценку рисков нефтяного загрязнения побережья Самбийского полуострова, курортных зон и Куршской косы Калининградской области. Так, например, из 22 промоделированных ситуаций (дней) шесть раз наблюдалась полная или частичная посадка нефти на берег Самбийского полуострова в случае какой-либо аварии или нелегального сброса нефтепродуктов в исследуемом районе.

5.2 Результаты модельных расчетов для юго-восточной части Черного моря

Для тестового района юго-восточной части Черного моря произведено сопоставление выделенных по спутниковым изображениям траекторий распространения нефтяных сликов, обусловленных естественными нефтепроявлениями, и пространственных полей (http://dvs.net.ru/mp/data/main ru.shtml), поверхностных течений рассчитанных по комбинированным данным о полях приповерхностного ветра и геострофических скоростей. Геострофическая скорость восстанавливалась по данным спутниковой альтиметрии с использованием регионального массива картированных аномалий уровня AVISO и средней динамической топографии, а для расчета ветра использовалась оперативная модель NOMADS, NOAA (https://nomads.ncdc.noaa.gov/nomads.php). В целом наблюдалось неплохое соответствие, особенно при устойчивых умеренных ветрах. Установлено, что рассчитанные по модели поля поверхностных скоростей не разрешают мелкомасштабные особенности, которые выявляются по спутниковым данным, и могут влиять на траекторию распространения загрязнений. По результатам анализа спутниковых данных установлено, что при наличии мелкомасштабных вихревых структур вблизи точки выхода нефти на поверхность возможен двухэтапный процесс дрейфа нефтяных пленок: (і) на начальном этапе нефтяное загрязнение оказывается вовлеченным в вихревые движения, (ii) на периферии вихря вляние ветра и геострофических течений становится определяющим и слик начинает переноситься согласно описанной выше модели, но с начальными условиями, отличными от начальных условий в точке выхода (рис. 8). После выхода на поверхность нефтяной слик описывает дугу, будучи вовлеченным в вихревые движения. Постепенно слик сужается, а затем сильно искривляется и распространяется в северо-западном направлении. Общая площадь нефтесодержащего слика – около 60 км².



Рис. 8. Распространение нефтяного слика в юго-восточной части Черного моря в районе естественных выходов на поверхность углеводородов. РЛИ SAR Sentinel -1A от 08.04.2017, 03:16 UTC

Усовершенствована методика восстановления 6. трехмерной пространственной структуры элементов на циркуляции основе совместного анализа спутниковых данных высокого разрешения. Проведена верификация результатов в ходе натурных измерений.

Усовершенствованная методика восстановления трехмерной структуры элементов циркуляции вод заключается в комплексном анализе квазисинхронных спутниковых данных, полученных в микроволновом и оптическом диапазонах электромагнитного спектра. Среди различных гидродинамических процессов, оказывающих влияние на распространение загрязнений, особый интерес представляют субмезомасштабные вихревые структуры. Основная задача заключается в выяснении пространственной структуры субмезомасштабных вихрей, которые на радиолокационных изображениях проявляются за счет сликового механизма. Вопрос состоял в том, являются ли эти процессы квазидвумерными, или их влияние распространяется и по глубине. Для доказательства трехмерной структуры этих процессов были подобраны спутниковые данные SAR-C Sentinel-1 и MSI Sentinel-2 или OLI Landsat-8 близкие по времени съемки и содержащие проявления одних и тех же вихревых структур. Совместный анализ спутниковых изображений, полученных разными сенсорами, позволил провести оценку глубины распространения вихревых образований. Исследования проводились для акватории Гданьского залива, где, как показали наши исследования, субмезомасштабные вихревые процессы формируются постоянно в летний период. Отсутствие проявлений вихрей на радиолокационных изображениях, в то время как на синхронных оптических данных они присутствуют, свидетельствует о том, что биогенная пленка либо разрушена ветром, либо, скорее всего, не образовывалась, вследствие того, что гидрозоли (водоросли, взвешенное вещество), которые являются оптическими трассерами вихрей, находились не в приповерхностном слое, а на глубине. Подтверждением этой гипотезы служат проведенные нами измерения распределения концентрации хлорофилла-а в Гданьском заливе. Вертикальное распределение концентрации хлорофилла-а характеризовалось наличием подповерхностного максимума на глубине ~ 5 м (рис. 9). Именно в этом слое наблюдается максимальное скопление гидрозолей (в данном случае фотосинтезирующих классов водорослей), определяющих оптические неоднородности, соответствующие проявлению вихревых структур на спутниковых изображениях видимого диапазона.



Рис. 9. Характерное распределение концентрации хлорофилла-а в прибрежной зоне Гданьского залива в августе 2018 г.

Применение методики восстановления трехмерной пространственной структуры элементов циркуляции на основе совместного анализа спутниковых данных высокого пространственного разрешения, проведенное для субмезомасштабных вихревых структур Гданьского залива, позволяет сделать вывод, что вихревые образования представляют собой не тонкие, сугубо поверхностные процессы, а оказывают свое влияние на определенный столб водной толщи.

Верификация спутниковых данных проводилась путем измерений профиля скорости и направления течения в районе вихревых структур с помощью акустического профилографа течений ADCP. Так, например, результаты измерений параметров вихревого диполя, выявленного на радиолокационном изображении, показал, что влияние диполя распространялось на глубину не менее 20 м (рис. 10).

С целью определения пространственной структуры вытока р. Вислы проведен совместный анализ данных спутникового РСА ИСЗ Envisat и многоканального спектрометра оптического диапазона MERIS ИСЗ Envisat, полученных синхронно в юго-восточной части Балтийского моря над Гданьским заливом, и отражающих процессы, связанные с вытоком реки Висла (рис. 11). Поверхностная граница фронта на РЛИ находится мористее, чем зона распространения взвеси вблизи Хельской косы, на карте концентрации взвешенного вещества. Установлено, что процесс является трехмерным, и для восстановления реалистичной картины необходимо использовать одновременно данные разных диапазонов электромагнитного спектра.



Рис. 10. Слева – проявление вихревого диполя на радиолокационном изображении Radarsat-2 с нанесенными поверхностными течениями по данным ADCP. Справа – вертикальная структура течений



Рис. 11. а) Фрагмент ASAR Envisat изображения морской поверхности юго-восточной части Балтийского моря. Точками выделен поверхностный гидрологический фронт, образованный вытоком Вислы. График на врезке отображает вариации РЛ-сигнала поперек фронта; б) карта концентрации взвешенного вещества, восстановленная по данным MERIS Envisat

7. Выявлен прямой и опосредованный вклад динамических процессов, в первую очередь вихревых структур и струй, в процесс распространения загрязнений в морских акваториях.

7.1 Распространение нефтяных загрязнений в Гданьском заливе под действием мезомасштабных вихревых структур

На сегодняшний день наблюдения попадания пятен нефтепродуктов в область мезомасштабного вихря в Балтийском море с заметным нефтяным загрязнением единичны. Это объясняется рядом факторов: малым временем жизни самих пятен (от нескольких часов до первых суток), нерегулярностью получения информативных спутниковых изображений оптического диапазона из-за высокого процента дней с

облачностью в рассматриваемом регионе, ограниченным диапазоном скоростей ветра (примерно 2–5 м/с), при которых вихри проявляются на изображениях «всепогодных» радиолокаторов с синтезированной апертурой. Возможно также, что и некоторые типы вихрей в Балтике являются сравнительно короткоживущими образованиями (механизмы вихреобразования в этом море изучены недостаточно), а информация о времени жизни мезомасштабных вихрей в Балтийском море на сегодняшний день ограничена.

Ha основе анализа последовательных спутниковых изображений впервые продемонстрировано влияние мезомасштабного антициклонического вихря на перемещение пятен нефтепродуктов в северной части Гданьского залива и оценены скорости этого перемещения в зависимости от места их попадания в область антициклона и его присоединенного циклона (вихревого диполя). В работе использованы оптические и радиолокационные (РЛИ) спутниковые изображения, соответствующие датам наблюдения на них пятен нефтепродуктов (9 и 10 июня 2015 г.) и ближайшим к ним дням. Это оптические изображения радиометра MODIS спутника Aqua (9 июня, пространственное разрешение 250 м), AVHRR NOAA-18 (9–10 июня, 1 км), TIRS Landsat-8 (8 июня, 100 м), а также РЛИ радаров с синтезированной апертурой (SAR) спутников Sentinel-1A (9 и 11 июня, 10 м) и Radarsat-2 (10 июня, 100 м). Наблюдение за мезомасштабной динамикой района исследования охватывал более длительный период примерно в полтора месяца (с 15 мая по 7 июля 2015 г.).

Цепочка из пяти пятен нефтепродуктов прослеживалась на трех последовательных спутниковых изображениях за 9-10 июня 2015 г. Общее время наблюдения пятен нефтепродуктов составило 29 часов. Длина цепочки пятен в течение этого времени практически не менялась (21-23 км), суммарная площадь фрагментов к моменту получения последнего изображения заметно увеличилась с 9.8 до 25,8 км². Последовательные спутниковые изображения впервые наглядно продемонстрировали влияние локальной мезомасштабной линамики вол на перемешение пятен нефтепродуктов. Показано, как менялась форма, длина, площадь, направление и скорость переноса цепочки пятен в течение 29 часов из-за различий в скоростях ее отдельных пятен, вовлеченных в вихревое движение, в зависимости от их положения относительно центра/периферии вихря. Наибольшая (около 20 см/с) скорость дрейфа наблюдалась у пятна, оказавшегося в области периферии антициклона (области максимальных скоростей). Наблюдавшийся дрейф пятен под совместным действием ветра и течений в вихревой системе в данном случае не соответствовал его прогнозу на основе численной модели Seatrack Web. Очевидно, что прогноз перемещения нефтяных и других загрязнений в таких динамически активных районах, как Юго-Восточная Балтика, требует учета локальной мезомасштабной и субмезомасштабной циркуляции вод, что достижимо только с помощью спутниковых радиолокационных и оптических данных высокого пространственного разрешения.

7.2 Распространение нефтяных пленок в районе турецкого шельфа под действием мелкомасштабных вихревых движений

На основе анализа спутниковых PCA- изображений, содержащих слики естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Черного моря в районе турецкого шельфа вблизи г. Ризе установлено, что в 10-12 процентах случаев нефтяная пленка после выхода на поверхность оказывается вовлеченной в мелкомасштабные

вихревые движения, которые зачастую радикальным образом меняют ожидаемую (расчетную) траекторию распространения слика. Точка всплытия естественных нефтепроявлений на поверхность в этом районе находится на расстоянии около 5 км от берега, и преобладает вдольбереговое направление переноса загрязнений. Установлено, что в зависимости от размеров, знака завихренности и траектории движения вихря, вовлеченность слика в вихревые движения может иметь как положительный эффект, способствуя кросс-шельфовому переносу загрязнений и очищению прибрежной зоны, так и отрицательный, способствуя выносу нефтяного загрязнения на берег (рис. 12).



Рис. 12. Фрагменты РСА-изображений морской поверхности юго-восточной части Черного моря в районе турецкого шельфа вблизи г. Ризе, выявляющие траектории распространения нефтяных пленок, обусловленных естественными выходами нефти с морского дна: a) SAR Sentinel 1B. 26.06.2018, 15:09 GMT. Вдольбереговой перенос загрязнений; б) SAR Sentinel 1A. 16.11.2017, 15:10 GMT. Перенос в сторону открытого моря; в) SAR Sentinel 1A. 30.08.2018, 03:25 GMT. Возможный вынос загрязнений на берег

7.3 Распространение взмученных вод вдоль побережья Самбийского полуострова под действием вдольберегового струйного течения

Вдольбереговое струйное течение сформировалось вдоль северной оконечности Самбийского полуострова как часть вихревого диполя. Сильная взмученность вод в прибрежной зоне способствовала четкому проявлению диполя на спутниковых изображениях видимого диапазона, в первую очередь в поле общего содержания взвешенного вещества. На основе данных приборов OLCI Sentinel-3, MSI Sentinel-2 и MODIS Terra/Aqua прослежена динамика вихревого диполя в течение трех дней 7 – 9 августа 2018 (рис. 13).



Рис. 13. Проявление трансформации вихревого диполя в течение 7 - 9 августа 2018 г. в поле TSM: а – OLCI Sentinel-3A за 07 августа 2018 г.; б – OLCI Sentinel-3A за 08 августа 2018 г.; в – MSI Sentinel-2B 09 августа 2018 г.

Синхронно со спутниковыми наблюдениями проводились измерения параметров течений в исследуемом районе с помощью ADCP и комплексом лагранжевых дрифтеров. Граница взмученных вод определялась с помощью СТД зонда, оснащенного датчиком мутности. Совместный анализ спутниковых данных и данных натурных измерений позволил оценить пространственные и динамические характеристики различных частей вихревого диполя и сопуствующего ему струйного течения. Измерения с помощью ADCP в районе м. Таран показали, что скорость прибрежного струйного течения составляла порядка 80 см/с (рис. 14). Вне его скорость течения резко падала и не превышала 20 см/с. Результат последовательного картирования контура вихревого диполя по данным OLCI Sentinel-3A (за 7 и 8 августа) и MSI Sentinel-2В (за 9 августа) наглядно показал трансформацию и траекторию вихревого диполя (рис. 15), который за трое суток переместился от м. Таран до середины Куршской косы, пройдя расстояние около 63 км. Дрифтерные эксперименты показали, что те дрифтеры, которые не попали в струйное течение (были выпущены дальше от берега), перемещались со максимальной скоростью 20 см/с и достигли Куршской косы через 5 с лишним суток. Дрифтер, который был специально запущен в зоне действия вихревого диполя, был захвачен струйным течением и двигался в восточном направлении со скоростью 70 – 80 см/с. Он дрейфовал только чуть более 3-е суток.

Таким образом, было показано, что сильно взмученные воды, а соответственно и любые иные загрязнения, попавшие в морскую среду в районе м. Таран (а возможно, и у западного побережья Самбийского полуострова) уже через три дня могут оказаться на пляжах Куршской косы, которая является государственным природным национальным парком и внесена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.



Рис. 14. Цветосинтезированное изображение MODIS Terra за 07 августа 2018 г. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съемки



Рис. 15. Сводная картина трансформации и распространения вихревого диполя, построенная по данным OLCI Sentinel-3A (за 7 и 8 августа) и MSI Sentinel-2B (за 9 августа)

8. Разработка методик построения прогноза распространения различных типов загрязнений с учётом более детальной информации о фактической пространственно-временной структуре и взаимодействии мезо- и субмезомасштабных процессов в тестовых районах.

Работы по усовершенствованию методик построения прогноза распространения различных типов загрязнений с учётом более детальной информации о фактической пространственно-временной структуре и взаимодействии мезо- и субмезомасштабных процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов) в районах, подверженных различным типам загрязнений позволили прийти к следующим выводам:

(1) Мезо- и субмезомасштабные процессы (антициклонические и циклонические вихри, вихревых диполи, струи, проявления внутренних волн на поверхности моря и фронты) существенным образом влияют на скорость и направление перемещения нефтяных пятен.

(2) В случае умеренных ветров и слабых течений, влияние мезо- и субмезомасштабных процессов на адвекцию нефтяных пятен становится первостепенным фактором.

(3) В случае обнаружения цепочки нефтяных пятен, влияние мезо- и субмезомасштабных процессов на адвекцию нефтяных пятен индивидуально, поскольку каждое пятно попадает под воздействие конкретной части вихревого поля, отличающееся скоростью и направлением движения вод даже в случае индивидуального вихря. Эта ситуация отличается от воздействия существенно более крупномасштабных и, поэтому, более однородных (относительно нефтяного пятна) полей ветра и генеральных течений.

(4) Оперативная интерактивная численная модель Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI) прогноза дрейфа и эволюции нефтяных пятен в Балтийском море, рекомендованная ХЕЛКОМ для использования всеми балтийскими странами в случае обнаружения нефтяных загрязнений, даже с пространственным разрешением 1 морская миля не всегда дает правильный прогноз дрейфа нефтяного пятна при наличии мезомасштабных вихрей.

(5) В настоящее время основные исполнители проекта (О.Ю. Лаврова и А.Г. Костяной) участвуют в валидации высокоразрешающей гидродинамической модели с пространственным разрешением 230 м, разработанной совместно ИО РАН и Таллиннским технологическим университетом для Балтийского моря. Модель точно воспроизводит мезомасштабную и субмезомасштабную динамику вод, что проверялось по спутниковым изображениям за разные даты 2015 года.

(6) Вывод: методика построения прогноза распространения различных типов загрязнений с учётом более детальной информации о фактической пространственновременной структуре и взаимодействии мезо- и субмезомасштабных процессов должна включать оперативные спутниковые радиолокационные и оптические данные высокого разрешения (10-30 м) и результаты численного моделирования с разрешением порядка 100-200 м.

9. Получены количественные оценки межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости естественного и антропогенного нефтяного загрязнения морской поверхности в тестовых районах по спутниковым данным за 2017-2018 гг.

9.1 Оценка межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости антропогенных нефтяных загрязнений морской поверхности в юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным за 2017-2018 гг.

На основе анализа спутниковой радиолокационной информации за 2017 и 2018 гг. получены количественные характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости естественного и антропогенного нефтяного загрязнения морской поверхности юго-восточной Балтики по спутниковым данным за 2017-2018 гг. Многолетние спутниковые и натурные исследования этого района показали, что естественных выходов углеводородов в этом районе нет, поэтому все проявления нефтяных пленок на поверхности моря можно с уверенностью считать антропогенными.

В 2017 г. в районе мониторинга в Юго-восточной Балтике всего было обнаружено 47 нефтяных пятен общей площадью 82 км², которые распределялись по сезонам следующим образом: зима – 1 пятно (0.39 км²), весна – 16 пятен (33.84 км²), лето – 23 пятна (41.96 км²), осень – 7 пятен (5.45 км²). В 2018 г. всего было обнаружено 21 пятно общей площадью 40 км², которые распределялись по сезонам следующим образом: зима – 2 пятна (0.64 км²), весна – 11 пятен (31.57 км²), лето – 5 пятен (4.50 км²), осень – 3 пятна (3.36 км²). Что касается межгодовой изменчивости нефтяного загрязнения, то количество нефтяных пятен в районе мониторинга на протяжении последних 10 лет варьируется в пределах 20-50 штук. Как правило, весной и летом в этом районе наблюдается наибольшее количество пятен, что объясняется более благоприятными погодными условиями (скорость ветра в диапазоне 3-8 м/с), которые влияют на возможность детектирования нефтяных пятен в море. Пространственное распределение нефтяных пятен вновь показало, что районами, где чаще всего обнаруживаются нефтяные пятна, являются судоходные трассы западнее Самбийского полуострова, включая подходы к Калининградскому морскому судоходному каналу.

9.2 Оценка межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости естественных нефтяных загрязнений морской поверхности в юго-восточной части Черного моря по спутниковым данным за 2017-2018 гг.

С целью получения количественных оценок и выявления изменчивости параметров естественных нефтепроявлений на морской поверхности, проведён анализ всех радиолокационных изображений, полученных за 2017-2018 гг. в юго-восточной части Черного моря. В этой части акватории наблюдаются естественные выходы нефти на поверхность моря: (i) на турецком шельфе вблизи г. Ризе и (ii) в грузинском секторе Чёрного моря в районе Поти-Батуми. Построена карта нефтяного загрязнения поверхности юго-восточной части Черного моря за 2017-2018 гг. (рис. 16).

Определены совокупные площади нефтяных загрязнений и исследована их межгодовая изменчивость (рис. 17).

В районе грузинского шельфа интегральная площадь нефтяного загрязнения в 2017 г. составляла 1235 кв. км, а в 2018 году эта площадь увеличилась более чем в полтора раза вплоть до 2083 кв. км. Следует подчеркнуть, что более половины всех естественных нефтепроявлений, выявленных на морской поверхности в этом районе, имеют площади, превышающие 10 км², а в 25% выявленных случаев индивидуальные площади нефтепроявлений превосходят 20 км² (рис. 18а).

Ежегодная интегральная площадь нефтепроявлений в районе турецкого шельфа варьирует в пределах 320-350 кв. км, межгодовая изменчивость не превышает 10 %. Более половины всех выявленных в этом районе естественных нефтепроявлений имеют площади менее 5 кв. км. Однако встречаются и пятна площадью более 15 кв. км, однако их доля не превышает 10%. (рис. 18б)

Определена сезонная изменчивость количества нефтяных пятен и их суммарной площади, которая в большой степени определяется сезонной изменчивостью гидрометеорологических условий в тестовых районах.



Рис. 16. Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности за 2017-2018 гг. над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Черного моря



Рис. 17. Совокупные площади загрязнения морской поверхности юго-восточной части Черного моря в результате естественных нефтепроявлений, выявленные за год по спутниковым данным



Рис. 18. Изменчивость индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен природного происхождения, выявленных по спутниковым данным на морской поверхности в районе грузинского шельфа Черного моря (а) и турецкого шельфа Черного моря (б)

10. Оценены риски нефтяного загрязнения акватории и побережья для тестовых районов на основе многолетних спутниковых данных о нефтяном загрязнении, численного моделирования и гидрометеорологической информации

10.1 Оценка рисков нефтяного загрязнения акватории и побережья юго-восточной части Балтийского моря на основе многолетних спутниковых данных о нефтяном загрязнении, численного моделирования и гидрометеорологической информации

На основе многолетних спутниковых данных о нефтяном загрязнении, численного моделирования и гидрометеорологической информации (модель Seatrack Web) построены сводные карты рисков нефтяного загрязнения для различных частей Юго-восточной Балтики: (1) судоходная трасса, подходящая к входу в Калининградский морской судоходный канал; (2) район к западу от Самбийского полуострова; (3) нефтяная платформа D-6; (4) подводный нефтепровод между платформой и берегом. Установлены ареалы потенциально возможного нефтяного загрязнения морской среды и береговой зоны от вышеуказанных источников на основе построения обобщенных карт (на основе ежедневных карт) вероятности загрязнения окружающей среды для каждого из 4 исследуемых районов для I, II, III и IV кварталов 2017 г. в отдельности (для исследования сезонной изменчивости), и 2017 года в целом.

На рисунке представлена карта вероятности нефтяного загрязнения района Гданьского залива и берегов РФ и Польши в случае обнаружения нефтяного загрязнения на отрезке судоходной трассы (красная линия), подходящей к входу в Калининградский морской судоходный канал. Именно на этом участке наблюдается наибольшее количество нефтяных пятен. Сводная карта вероятности нефтяного загрязнения для 2017 г. показывает, что не только акватория Гданьского залива, но и побережье большей части Вислинской косы, а также западный берег Самбийского полуострова от Балтийска до мыса Таран с вероятностью в 5% подвержены нефтяному загрязнению в любое время года (рис. 19).



Рис. 19. Сводная карта вероятности нефтяного загрязнения Гданьского залива для 2017 г.

10.2 Оценка рисков нефтяного загрязнения акватории и побережья юго-восточной части Черного моря на основе многолетних спутниковых данных о нефтяном загрязнении, численного моделирования и гидрометеорологической информации

На основе обобщения и анализа многолетних рядов спутниковых данных, полученных над юго-восточной частью Черного моря, проведены оценки рисков нефтяного загрязнения морской поверхности в результате естественных выходов нефте-углеводородов с морского дна. Построены карты, позволяющие оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности вблизи естественных выходов нефти на поверхность Черного моря в грузинском секторе Чёрного моря в районе Поти-Батуми и на турецком шельфе вблизи г. Ризе (рис. 20).

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, в районе Поти-Батуми составляет около 4500 км². Площадь, подверженная загрязнению с вероятностью более 50% составляет 1000 км². Примерно 180 км² акватории имеют высокий риск загрязнения. Построены диаграммы траектории распространения нефтяных сликов, выявленные по спутниковым данным и выявлено наличие существенной сезонной изменчивости направления распространения нефтяных сликов, в первой половине 2017 г. доминирующее направление поверхностных течений вблизи точки всплытия медленно менялось в течение полугода от северного до юго-восточного (рис. 21). В этом районе с высокой степенью вероятности может происходить кросс-шельфовый перенос нефтяного загрязнения в том числе и по направлению к берегу. На основе спутниковых данных установлено также, что в условиях, когда преобладающее направление ветра и течений сохраняется в течение длительного времени, нефтяная пленка может распространяться на большие расстояния – вплоть до 45-50 км от точки всплытия.

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, у турецкого шельфа составляет около 450 км². Площадь, подверженная загрязнению с вероятностью более 50% составляет 150 км². Примерно 50 км² акватории имеют высокий риск загрязнения. В этом районе преобладает вдольбереговое направление переноса загрязнений, однако точка всплытия находится на расстоянии около 5 км от берега, что существенно повышает риски загрязнения побережья.



Рис. 20. Вероятность загрязнения различных участков морской поверхности вблизи естественных выходов нефти на поверхность в юго-восточной части Черного моря



Рис. 21. Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Черного моря в районе грузинского шельфа по результатам спутниковых наблюдений за 2017

10.3 Определение зон рисков потенциального загрязнения береговой черты на основе результатов дрифтерных экспериментов в юго-восточной части Балтийского моря

За время проведения четырех серий экспедиционных работ по исследованию характера циркуляции прибрежных вод Гданьского залива в юго-восточной части Балтийского моря (2015-2018 гг.) было запущено в море 22 лагранжевых дрифетра. Дрифтеры запускались с маломерного судна в различных районах, при разном удалении от берега и при разных гидрометеорологических условиях. Накопленная статистика позволила выявить зоны побережья юго-восточной части Балтийского моря, на которые наиболее часто выносятся пассивные лагранжевые дрифтеры.

Были установлены 3 наиболее вероятные ситуации дрейфа пассивных буев:

1) В случае преобладания апвеллингового типа течения, формирующегося за счет воздействия ветров восточных румбов, и как следствие присутствия незначительных скоростей поверхностных течений в акватории моря (не более 25 см/с) большинство запущенных дрифтеров в конечном итоге попадают в узкую полосу береговой линии в районе поселка Янтарный. Данный регион характеризуется большим запасом рекреационных ресурсов и является широко известным курортным районом. Как правило, лагранжевые дрифтеры выносятся в район поселка Янтарный спустя двое-трое суток после запуска в акваторию у мыса Таран.

2) В случае преобладания даунвеллингового типа течения, формирующегося за счет воздействия ветров западных румбов, и как следствие присутствия значительных скоростей поверхностных течений в акватории моря (до 80-90 см/с) большинство запущенных дрифтеров в конечном итоге попадают на территорию заповедника «Куршская коса» как на территорию Российской Федерации, так и на территорию Литовской Республики. Данный регион представляет собой уникальный природный объект и включен в список особо охраняемых территорий под эгидой ЮНЕСКО. Как правило, лагранжевые дрифтеры выносятся в район Куршской косы спустя трое-пять суток после запуска в акваторию у мыса Таран.

3) В случае присутствия в непосредственной близости от Самбийского полуострова сложных вихревых диполей, лагранжевые дрифтеры ведут себя непредсказуемо и могут

продолжать свой дрейф в строго локализованном районе в течение длительных промежутков времени. Такой дрейф может проходить как минимум в течение 10 суток.

Полученная в ходе дрифтерных экспериментов информация позволила выявить 2 зоны экологического риска на территории Калининградской области, в случае попадания в акваторию юго-восточной части Балтийского моря различного рода загрязнений, распространяющихся пассивно по акватории моря. Это пляжная зона у поселка Янтарный и район заповедника «Куршская коса». Полученный статистический массив выноса лагранжевых дрифтеров на береговую линию с имеющимися оценками времени распространения И дополнительным привлечением информации 0 гидрометеорологической ситуации в регионе, позволяет провести оперативную оценку распространения загрязнений по акватории моря и локализации районов с максимальным воздействием на окружающую среду. С другой стороны, в настоящее время задача циркуляционных процессов при наличии моделирования В районе мезо-И субмезомасштабных вихревых структур остается сложно воспроизводимой, в связи с чем немаловажной остается и необходимость оперативного привлечения спутниковых изображений в различных диапазонах электромагнитного спектра для корректировки прогноза возможного распространения пассивных поверхностных загрязнений по акватории моря.

11. Проведена верификация спутниковых данных на основе результатов, полученных в ходе проведения натурных подспутниковых экспериментов и модельных численных расчетов.

11.1. Натурные измерения в районе выноса р. Мзымта в апреле 2018 г.

В период с 20 по 29 апреля 2018 г. были проведены синхронные со спутниковой съемкой натурные измерения параметров плюма р. Мзымта с маломерного судна с помощью акустического доплеровского профилографа скорости течения ADCP RDI WH 300 кГц совместно с выполнением гидрологических станций СTD зондирования. Производился также отбор проб воды с поверхностного горизонта для дальнейшего лабораторного анализа с целью определения концентрации взвешенного вещества и сравнения полученных результатов с результатами, полученными по спутниковым данным. В течение экспедиционных работ было выполнено 5 выходов в море: 21, 24, 25, 26 и 28 апреля. Из них 2 подробные съемки галсами у устья реки Мзымта и 4 поперечных разреза через весь плюм. Всего было выполнено 70 станций СTD-зондирования. Карта-схема расположения станций CTD-зондирования представлена на рис. 22.

В период проведения экспедиционных работ было получено и проанализировано 13 спутниковых изображений, из них 5 радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1; 4 изображения MSI Sentinel-2; 2 изображения OLI/TIRS Landsat-8; по одному OLCI Sentinel-3 и ETM+ Landsat-7 (табл. 1).

Данные MODIS Aqua/Terra и VIIRS-NPP получались ежедневно. Все спутниковые данные в оперативном режиме интегрировались в систему STS, анализировались и, исходя из полученной информации, планировались измерения на следующий день. По полученным оптическим данным строились карты поверхностной температуры, карты полного содержания взвешенного вещества и концентрации хлорофилла-а. В дальнейшем был проведен совместный анализ спутниковой информации и результатов подспутниковых измерений, который позволил получить следующие результаты и сделать предварительные выводы.



Рис. 22. Схема расположения станций СТД-зондирования в плюме р. Мзымта в 2018 г.

1. Проведено сравнение результатов выделения границ речного плюма Мзымты, определенных по оптическим спутниковым данным - цветосинтезированным изображениям в естественных цветах (RGB True color), картам полного содержания взвешенного вещества (TSM), картам концентрации хлорофилла-а (Chl-a); и измерениям in-situ с помощью CTD зондирования параметров температуры, солености, мутности (T, S, Turb).

Задача определения размера и границ речного плюма по спутниковым данным оптического диапазона оказалась сложнее, чем кажется на первый взгляд. Лучше всего границы плюма идентифицировались на RGB True color, цветосинтезированных по данным сенсора MSI ИСЗ Sentinel -2 (рис. 23а). Границы хорошо выражены за счет контрастных оптических различий речных и морских вод (как принято считать). В период экспедиционных работ максимальное удаление границы плюма от береговой черты наблюдалось 28 апреля и составляло 4,38 км, определенное по спутниковому True color изображению MSI Sentinel-2 (рис.23а). Условная, максимальная ширина плюма составляла 3,52 км.

Используя стандартные алгоритмы, рекомендуемые Европейским космическим агентством, были построены карты TSM (рис. 23б) и Chl-a (рис. 23в). На основе карты Chl-a определить границы плюма сложнее. Они размываются, вынос реки Мзымта выглядит более обширным и однородным. Повышенное значение концентрации Chl-a в прибрежной зоне может быть вызвано не только выносом речных вод. В поле TSM структура плюма выглядит сложнее, область с максимальными значениями более локализована. Возникает новая задача - какое использовать пороговое значение, для

"очерчивания" границ плюма, особенно для приустьевой области, где концентрируется наибольшее количество терригенного вещества.

Дата	Выход в море	Спутниковые данные	Время спутниковой съемки (GMT)	Комментарии
21.04.18	ДА	MSI (Sentinel 2B)	08:15	
		ETM+ Landsat 7	08:08	
		SAR-C Sentinel-1A	15:11	
22.04.18	ДА	OLI Landsat-8	08:00	Сплошная облачность
23.04.18	ДА	MSI (Sentinel 2)	08:17	
25.04.18	ДА	SAR-C Sentinel-1A	03:32	Многочисленные вихри
		OLCI (Sentinel 3)	08:01	вне зоны расст
		SAR-C Sentinel-1B	03:24	Проявление вихрей за счет сликов
26.04.18	ДА	MSI (Sentinel 2A)	08:26	Проявление вихрей
		SAR-C Sentinel-1A	15:19	
27.04.18	HET	SAR-C Sentinel-1B	15:10	
28.04.18	ДА	MSI (Sentinel 2B)	08:17	Разрез поперек плюма
29.04.18	HET	OLI Landsat-8	08:07	

Таблица 1. Спутниковые данные высокого пространственного разрешения, полученные в период экспедиционных работ в апреле 2018 г.

Анализируя графики пространственного распределения температуры, солености и мутности (рис. 24), построенные на основе СТД-зондирования 28 апреля 2018 года, были получены следующие выводы:

• границы распространения речных вод, определенные по натурным измерениям и по спутниковым изображениям не совпадают. Была выделена точка (станция №4), после которой уменьшение/увеличение исследуемых характеристик происходило постепенно, равномерно и между соседними точками незначительно. Данная станция располагается на расстоянии 200-400 м от береговой зоны (в зависимости от интенсивности стока). Назовем условно эту область "выходом на стационарный режим". Из чего следует, что "поймать" яркую границу плюма, как на изображениях True color, на основе результатов натурных измерений в поле температуры, солености и мутности невозможно.





Рис. 23. Проявление выноса р. Мзымта на MSI Sentinel-2 В от 28 апреля 2018 г.: а) True color изображение с нанесенными станциями СТД-зондирования, выполненными в этот день, б) карта TSM, в) карта Chl-а

Из чего можно сделать следующий вывод: для "контрастных" изображений в True color достаточно тонкого подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным 5 НФУ, в данных единицах измеряет наш датчик мутности). Качественно на изображениях True color практически была незаметна разница в величинах в приустьевой области и на дальних точках, что в некоторых случаях различается в 20 раз.



Рис. 24. Пространственные распределения полей солености, температуры и мутности по данным CTD-зондирования 28 апреля 2018

2. Проведена оценка границы выноса речных вод по глубине.

1. Как показали наши измерения, несмотря на километровые пространственные (поверхностные) размеры плюма, глубина "интрузии" речных вод составила не более 3-4 метров. В поле температуры и солености - это тонкая линза, распространяющаяся до 1,4 км от берега. Стоит отметить, что в поле мутности морских вод (по данным измерений insitu) речные воды представлены более мощным слоем, чем, например, в поле солености. В приустьевой зоне в приповерхностном слое значения T, S и Turb могут отличаться в десятки раз по сравнению со значениями на 5 метрах или на станции в 200 метрах от берега. Характерные значения температуры, солености и мутности на разных горизонтах представлены в таблице 2.

3. Проведен сравнительный анализ значений мутности вод на основе спутниковых данных и СТД-зондирований.

Безусловно, преимущество натурных измерений заключается в возможности получения разных параметров воды от поверхности до дна на разных горизонтах. Спутниковые данные - это некая интегральная величина в "столбе" морской воды, которую мы принимает за значения в приповерхностном слое. Стоит отметить, что единицы измерения, которые мы получаем дистанционными методами и контактными различны. Восстановленные по спутниковым данным на основе стандартных алгоритмов значения TSM измеряются в г/м³. А на основе оптического датчика мутности СTD-зонда - мы получаем условную единицу ФНУ. Поэтому открытым остается вопрос сопоставления этих данных. Ниже представлена сравнительная таблица значений мутности в реперных точках (таблица 3).

Таблица	2
---------	---

Параметры	Станция №1		Станция № 4		Станция № 15	
	(у устья)		(200 м от берега)		(4,38 км от берега)	
Глубина (м)	0	5	0	5	0	5
Температура (°С)	9	15,5	14	15,5	17	16
Соленость (ЕПС)	3	18	15	18	16	18
Мутность (ФНУ)	120	0	20	0	0	0

Таблица 3

Параметры	Станция №1	Станция № 4	Станция № 15
	(у устья)	(200 м от берега)	(4,38 км от берега)
TSM (Satellite)	100	80	15
Turbidity (CTD)	120	20	0

Основным выводом на данный момент является тот факт, что общепринятые рекомендованные алгоритмы пересчета взвешенного вещества по спутниковым данным требуют существенной доработки. При их применении для областей, подверженных речным выносам, отмечается сильное зашумление выходных данных. Они также малочувствительны к различиям на небольших расстояниях при высоких значениях мутности.

11.2. Натурные подспутниковые измерения в юго-восточной части Балтийского моря в районе Самбийского полуострова в 2018 г.

части Экспедиционные работы в юго-восточной Балтийского моря являлись продолжением исследований прибрежной циркуляции вод, которые проводятся нашим коллективом ежегодно, начиная с 2014 г. Подспутниковые измерения 2018 г. были выполнены с 31 июля по 11 августа и включали в себя: проведение съемки поля течений по данным акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) с борта маломерного судна с целью идентификации трехмерной структуры течений в возможных районах формирования вихревых образований; зондирование толщи вод высокоточным гидрологическим CTD-зондом, оснащенным дополнительным датчиком обратного рассеивания света (общей мутности) и датчиком концентрации хлорофилла-а с целью верификации результатов оптических наблюдений из космоса и получаемых на их основе карт концентрации хлорофилла-а и взвешенного вещества; проведение экспериментов с лагранжевыми дрифтерами с целью определения параметров прибрежных течений на разных глубинах и верификации результатов численного моделирования.

За период экспедиционных работ было выполнено 5 выходов в море: 1, 3,7,8, и 10 августа. Всего было выполнено 6 гидрологических разрезов с выполнением съемки параметров течений при помощи ADCP и проведено CTD-зондирование на 66 станциях. Схема разрезов приведена на рис. 25. Из года в год измерения выполняются по одним и тем же разрезам, CTD-зондирование осуществляется в одних и тех же точках, включая повторные измерения в рамках одной экспедиции. Это необходимо для накопления статистики и выявления межгодовой изменчивости гидрологических параметров. Протяженность разрезов огранивается двенадцатимильной зоной.



Рис. 25. Схема расположения гидрологических разрезов

Было запущено 10 лагранжевых дрифтеров в разных районах акватории и при разных гидрометеорологических условиях.

В период проведения экспедиционных работ было получено и проанализировано 18 спутниковых изображений, из них: 7 радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1; 4 изображения MSI Sentinel-2; 5 изображений OLCI Sentinel-3; по одному изображению OLI/TIRS Landsat-8 и ETM+ Landsat-7. Данные MODIS Aqua/Terra и VIIRS-NPP получались ежедневно. Все спутниковые данные в оперативном режиме интегрировались в систему STS, анализировались и, исходя из полученной информации, планировались измерения на следующий день и определялся район запуска лагранжевых буев. По полученным оптическим данным строились карты поверхностной температуры, карты полного содержания взвешенного вещества и концентрации хлорофилла-а. В дальнейшем был проведен совместный анализ спутниковой информации И результатов подспутниковых измерений, который позволил получить следующие результаты.

1) На основе серии спутниковых изображений, полученных в период 7 – 11 августа 2018 г. было прослежено формирование и распространение вихревого диполя, под влиянием которого сформировалось сильное вдольбереговое течение у северного побережья Самбийского полуострова (см. также пункт 7.3 настоящего отчета).

Результаты анализа спутниковых данных показали, что струя взмученных вод достигла побережья Куршской косы за 3 дня. Такой же результат показали как результаты дрифтерных экспериментов, так и результаты численного моделирования. В то же время измерения с помощью ADCP не подтвердили наличие вихревой структуры у м. Таран, которая идентифицируется на спутниковых изображениях, полученных синхронно с натурными измерениями. Результаты измерений показали, что у берега сформировалось сильное прибрежное течение со скоростями потока до 80 см/с, постепенно ослабевающим в мористую часть региона до скоростей 20 см/с (рис. 14). На рис. 26 представлены распределения скорости и направления прибрежных течений в районе проведения подспутникового эксперимента. По данным ADCP установлено, что на всем протяжении океанографического разреза поверхностная толща вод (в диапазоне глубин 0-20 метров) не содержит изменений в распределении направления течений. Течения по всей поверхностной толще направлены вдоль берега в северо-восточном направлении.

Примечательно, что скорости течений имеют ярко выраженный максимум в прибрежной зоне, достигая 60 см/с (на глубине первой ячейки ADCP ~ 4 м от поверхностности). При удалении в мористую часть скорости заметно ослабевают до величин 15-20 см/с. Однако, каких-либо вихревых структур при огибании течением мыса Таран по инструментальным измерениям зафиксировано не было.

Ниже слоя сезонного термоклина (19-22 метра от поверхности) располагается слой вод, на который, как правило, не распространяется ветровое воздействие и который не вовлекается в динамику вод при прохождении мезо и субмезомасштабных вихревых структур. Скорости течений в данном слое минимальны, не более 5-10 см/с, в связи с чем направление течений может определяться некорректно при измерениях ADCP с движущегося плавсредства. В то же время при проведении экспедиционных работ в данном районе в 2014 году при схожих гидрометеорологических и динамических условиях по инструментальным и спутниковым данным было зафиксировано присутствие вихревого диполя с несколькими центрами вращения и распространяющегося на глубину не менее 20 м (рис. 10).



Рис. 26. Распределение скорости и направления прибрежного течения 7 августа 2018 г. в районе м. Таран по данным ADCP

2) Получены параметры выноса вод из Калининградского залива.

В рамках выполнения экспедиционных работ по верификации спутниковых изображений в оптическом диапазоне, в 2018 г. было проведено исследование параметров выноса вод из Калининградского залива. По результатам исследования структуры течений в районе образования плюма по данным ADCP и CTD-зондирования было показано, что вынос вод распространяется по акватории Гданьского залива «тонким слоем», не более 1,5-2 м от поверхности. Результаты сопоставления серии последовательных спутниковых изображений в оптическом диапазоне (путем картирования последовательных контуров выноса вод из залива) с инструментально измеренными параметрами прибрежных течений позволяют сделать вывод о том, что плюм распресненных и оптически отличимых вод из Калининградского залива распространяется под действием преимущественно сформировавшейся системы прибрежных течений, а не под прямым влиянием ветрового воздействия. Эту гипотезу подтвердили дрифтерные эксперименты с буем, у которого парусность была 0%.

3) Дрифтерными экспериментами 2018 было подтверждено, что в отсутствие сильных прибрежных течений, в траектории лагранжевого дрифтера присутствуют инерционные петли.

Такие эксперименты предоставляют единственную возможность визуализировать инерционные колебания. С помощью спутниковых данных такую информацию напрямую получить невозможно. Численные расчеты такую ситуацию воспроизводят.

4) На основе дрифтерных экспериментов были определены зоны экологического риска в районе Самбийского полуострова (см. пункт 10.3)

Дрифтерные эксперименты, проведенные при разных гидрометеорологических условиях показали, что основная часть дрифтеров, запущенных в разных районах, при разных условиях и с парусами на разных глубинах, в конечном счете, оказывается на берегу в районе поселка Янтарный или при устойчивом западном ветре на побережье Куршской косы. Соответственно, и разного рода загрязнения потенциально могут выноситься именно на эти побережья.

11.3. Верификация спутниковых данных на основе результатов численного моделирования. Сравнение с результатами дрифтерных экспериментов.

Выполнено моделирование на основе Принстонской модели океана (POM) траекторий 2-х дрифтеров, выпущенных в разные периоды времени в августе 2018г. в поверхностном слое прибрежной области, прилегающей к Самбийскому п-ву (рис. 27). В качестве ветрового воздействия в модели были использованы данные реанализа ERA5 базы данных ECMWF (https://www.ecmwf.int/), временная дискретность данных – 1ч, пространственное разрешение ~ 30 км. Начальные распределения полей температуры и солености были взяты из базы данных COPERNICUS (http://marine.copernicus.eu/) на 00:00 01 августа 2018г. Для траекторий одного из дрифтеров было получено близкое соответствие: помимо близких направлений распространения и взаиморасположения в пространстве также были воспроизведены время совершения и размеры отдельных инерционных петель (ср. траектории дрифтера и модельной лагранжевой частицы с источником в т. 2_2, отмеченные красной и сиреневой линиями соответственно на рис. 27).



Рис. 27. Карта глубин в Юго-Восточной Балтике, на которую наложены траектории дрифтеров, выпущенных из точек 2_1 и 2_2, обозначенные желтой и сиреневой линиями соответственно, а также траектории соответствующих модельных лагранжевых частиц – синяя и красная линии. Начала траекторий отмечены точками

При выполнении совместного анализа временных серий данных моделирования приповерхностной горизонтальной скорости течения, скорости ветра, а также траекторий дрифтера и соответствующих модельных лагранжевых частиц было отмечено, что ярковыраженная замкнутая инерционная петля на начальном этапе их распространения была описана В период перестроения структуры течения В исследуемом районе, сопровождающимся его временным ослабеванием от 0,4 м/с до 0,1 - 0,2 м/с в течение 20-22 ч. Перестроение произошло при резкой смене направления ветра с южного на западное, при этом скорость ветра составляла 8-9 м/с. Дальнейшее распространение анализируемого дрифтера и соответствующей частицы на северо-восток вдоль Куршской косы происходило под воздействием интенсивного, со средней скоростью до 0,6 – 0,7 м/с. обширного течения, направленного на восток, и охватывающего всю область (прибрежную зону и открытое море) к востоку от м. Таран (рис. 28). По причине развития обширного течения модельные частицы, выпущенные из прибрежной зоны в окрестности м. Таран на различном расстоянии от берега, имели почти идентичные формы траекторий, направленные вдоль склона на северо-восток. Траектории частиц, выпущенные из тех же точек в придонном слое, имели более разнообразную форму, при этом преобладающее направление их распространения определялось структурой течения в том слое, из которого они были выпущены (ВКС, ХПС, халоклин) (рис. 29). Траектории частиц, выпущенных на придонном горизонте, который относится к ВКС, в основном были близки к траектории поверхностного дрифтера (рис. 29 а). У частиц, выпущенных из халоклина, преобладала тенденция распространения в сторону открытого моря (рис. 29 в). Траектории частиц, выпущенных из ХПС, имели промежуточное направление распространения (рис. 29 б).



Рис. 28. Модельное распределение поверхностной скорости течения в юго-восточной части Балтийского моря, на которое наложены распределения скорости ветра, (а) - на начальном этапе распространения частицы, выпущенной из точки 2_2, (10:00 GMT 10.08.2018 г.), а также (б) - в один из моментов времени (16:00 GMT 10.08.2018г.), когда лагранжева частица и дрифтер распространялись вдоль Куршской косы на северовосток. Точками 2_1 и 3 отмечены источники запуска частиц, отстоящие в сторону открытого моря



Рис. 29. Траектории лагранжевых частиц, выпущенных из придонного слоя в точках 2_2 (красные линии) (а), 2_1 (темно-зеленые линии) (б) и 3 (бордовые линии) (в), посчитанные для периода плавания дрифтера, выпущенного из точки 2_2

Для второго дрифтера, выпущенного из точки 2_1, не было получено близкого соответствия взаиморасположения траекторий в пространстве, при этом общее направление распространения, его изменения со временем, присутствие инерционных петель на траекториях и их очертания были воспроизведены удовлетворительно (ср. траектории дрифтера и модельной лагранжевой частицы с источником в т. 2_1, отмеченные желтой и синей линиями на рис. 27). Незамкнутые инерционные петли меньшего диаметра по сравнению с петлей, описанной дрифтером 2_2, которые присутствуют на траектории дрифтера 2_1, были описаны в период устойчиво невысоких скоростей течения (0.05-0.15 м/с), формирующегося на фоне частых (каждые 6ч.) изменения направления умеренного ветра со скоростью до 6 м/с.

Для периода времени, близкого к периодам распространения реальных дрифтеров, было проанализировано несколько карт концентрации взвешенного вещества, построенных на основе спутниковых данных. Было отмечено соответствие направления распространения взвеси в окрестности м. Таран и очертания областей ее повышенной концентрации со структурой модельных приповерхностных течений в данном районе.

12. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных в 2014-2016 гг., и результатов, полученных в ходе продления Проекта в 2017-2018 гг., в части выявления основных трендов в экологическом состоянии районов экологического риска, выявленных ранее.

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных в 2014-2016 гг., и результатов, полученных в ходе продления Проекта в 2017-2018 гг., в части выявления основных трендов в экологическом состоянии районов экологического риска, выявленных ранее. Получено, что за последние два года ситуация не изменилась к лучшему. Несколько увеличилось количество загрязнений морской поверхности в западной части Черного моря, связанных со сбросами с судов загрязненных вод. Так же с апреля по июль 2018 наблюдалось усиление грифонной активности в северо-западной части Черного моря, что привело к повышению загрязнения морской поверхности нефтяными пленками. Как показал спутниковый мониторинг значительно улучшилась ситуация в районе глубоководного порта Бронка (Санкт-Петербург, Финский залив), что связано с окончанием работ по дноуглублениям. Существенно повышения концентрации взвешенного вещества в данном районе больше не наблюдается. В то же время, в связи со строительством морского регазификационного терминала сжиженного природного газа в непосредственной близости от курортных городов Пионерский и Зеленоградск и в 4-х км от Национального парка «Куршская коса», резко повысилось антропогенное загрязнение акватории и ближайшего побережья, связанное с повышением взмученности вод и пленочными загрязнениями.

Результаты, полученные в ходе второго этапа исполнения проекта, представлены в 12 публикациях, индексируемых в базах данных Web of Science Core Collection, SCOPUS и РИНЦ. Были представлены 16 докладов на десяти международных и российских конференциях.

С материалами, посвященными данному проекту, можно ознакомиться на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_proj_555.htm.