

## **Краткое описание выполненных в 2014 году работ и полученных научных результатов**

Целью проекта является разработка методов восстановления параметров загрязнения морской поверхности, исследование влияния на их распространение динамических и циркуляционных процессов и определение экологического состояния акваторий морей России на основе комплексного анализа спутниковой информации. Поставленные в проекте задачи решаются на основе комплексного использования данных различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические данные многоспектральных и гиперспектральных сенсоров), пространственному разрешению и размерности.

На первом этапе исполнения проекта проведены систематизация и анализ разнородных данных спутникового дистанционного зондирования акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей за 2004–2014 гг., накопленных в ИКИ РАН, и их интегрирование в разработанный и функционирующий в ИКИ РАН геопортал, предназначенный для работы с данными спутникового дистанционного зондирования в целях решения задач исследования Мирового океана. Для этого были выполнены следующие работы:

- Проведен экспертный анализ подобранного для включения в геопортал массива спутниковых данных. Составлены таблицы детального описания спутниковых снимков, включающие перечень выявленных на каждом снимке явлений и процессов, оценку параметров и гидрометеорологические условия съемки.

- Определен список основных процессов и явлений на поверхности океана и в приземном слое атмосферы, анализ которых будет проводиться средствами геопортала.

- Разработана схема кодирования явлений, на базе которой осуществлена их привязка к системе работы с явлениями в геопортале.

- Определен оптимальный набор параметров и выработан формат для наиболее полного описания каждого класса явлений.

На момент написания отчета в геопортал интегрированы следующие данные спутникового дистанционного зондирования акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей:

- более 3600 сцен радиолокационных данных;
- более 10 000 сцен сенсоров спутников Landsat;
- более 300 сцен гиперспектрального сенсора Hyperion;
- 58 сцен гиперспектрального сенсора NICO;
- ежедневные данные MODIS Terra/Aqua за период с 2008 года по настоящее время.

В ходе исполнения первого этапа проекта были усовершенствованы специализированные инструменты для тематической обработки и комплексного анализа спутниковых данных в целях обеспечения возможностей определения типов и масштабов загрязнений, а также для получения их количественных оценок.

Отдельное внимание уделено усовершенствованию алгоритмов распознавания проявлений загрязнений морской среды различного происхождения по данным дистанционного зондирования. Важное место в проекте отведено усовершенствованию методик получения количественных оценок и определения масштабов загрязнений.

Проведена тематическая обработка отобранных спутниковых данных и феноменологическая идентификация различных видов антропогенных и биогенных загрязнений. По радиолокационным изображениям (РЛИ) выявлены пленочные загрязнения морской поверхности четырех основных типов, обусловленные:

- сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты;
- выносом сточных и речных вод, содержащих пленочные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения;
- грязевым вулканизмом и естественными выходами на морскую поверхность углеводородов, которые обнаруживаются в Черном и Каспийском морях;
- повышенной биологической продуктивностью, в том числе связанной с жизненными циклами хлорофилла-а и активным цветением водорослей.

Проведено картографирование нефтяных загрязнений морской поверхности для акватории Балтийского моря. Картографирование выполнено на основе анализа РЛИ за 2004-2013 гг. Выявлены районы, подверженные наиболее частому загрязнению нефтепродуктами. В Юго-Восточной Балтике наибольшее загрязнение наблюдается вдоль судоходных трасс, направленных в Клайпеду, Калининград, Гдыню и Гданьск. Район якорной стоянки у входа в Калининградский канал отмечается как наиболее загрязненная акватория.

На основе спутниковых радиолокационных и оптических данных выполнены идентификация и картографирование областей интенсивного цветения водорослей и распределения биогенных пленок. Для решения этой задачи выполнены следующие исследования:

- Проведена отработка методики различения сине-зеленых и диатомовых водорослей на основе совместного анализа спутниковых данных и подспутниковых измерений для акватории Рыбинского водохранилища. Результаты апробированы для тестовых акваторий Балтийского моря. Выявлены основные районы Балтийского моря, подверженные наиболее интенсивному цветению сине-зеленых водорослей (цианобактерий), каковыми являются: Готландский бассейн, Куршский и Вислинский залив, прибрежные зоны Финского и Рижского заливов, центральный и юго-западный районы Балтийского моря.

- Предложен оригинальный косвенный метод выявления областей интенсивного цветения водорослей для их последующего картографирования. Доказано, что радиолокационные образы долгоживущих следов за движущимися судами могут служить индикатором биогенной активности. На основе совместного анализа спутниковых радиолокационных данных и данных спутниковых сенсоров оптического диапазона установлено, что долгоживущие корабельные следы наблюдаются в тех районах, где в момент наблюдения происходит интенсивное цветение фитопланктона. При этом видимая длина следов может служить опосредованным параметром, выявляющим площадь акватории, занятую цветением.

- Развита методика разделения вод с различными характеристиками, а также подверженных различным антропогенным загрязнениям, базирующаяся на использовании инструментария, разработанного для работы с гиперспектральными данными сенсоров Nuregion и HICO, апробированная для тестовых районов Черного и Балтийского моря.

Накопленные и систематизированные спутниковые данные позволяют получать детальные сведения о фактическом пространственно-временном распределении мезо- и субмезомасштабных процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов) в различных районах, приближенные к реальному масштабу времени. На основе спутниковых данных проведены исследования пространственно-временной структуры и динамики мезо- и субмезомасштабных динамических процессов, которые влияют на перенос и перераспределение загрязнений, а также способствуют очищению от них водной среды для различных районов Черного и Балтийского морей. В том числе:

- На основе спутниковых данных проведен детальный анализ пространственно-временной изменчивости положения антициклонических и циклонических вихрей в Балтийском море, частоты их встречаемости, а также линейных размеров. Построены сезонные и обобщенные годовые карты положения вихрей в Балтийском море.

- Обобщены результаты по выявлению типов циркуляции вод в северо-восточной части Черного моря, характеризующихся различной степенью вихреобразования и различным влиянием на распространение загрязнений.

- Выявлены основные районы поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) в Черном и Балтийском морях. Для Черного моря ими являются: придунайский шельф, акватория вблизи южной и юго-западной оконечностей Крыма и северо-восточная часть Черного моря. ППВВ для акватории Балтийского моря наблюдаются в основном в Датских проливах. Определены отличительные особенности ППВВ в данных спутниковой радиолокации, характерные для каждой акватории, и количественные характеристики пакетов внутренних волн.

- Показано, что мезомасштабные и мелкомасштабные вихревые структуры (вихри, струи и диполи с характерным горизонтальным масштабом 5-30 км), существенным образом влияют на перераспределение взвеси в море и могут выносить воды с повышенным содержанием взвеси на расстояния до 50-100 км от берега. В частности, перенос взвешенного вещества вихревыми структурами является важным фактором увеличения мутности вод в различных районах Финского залива.

- Особое внимание уделено определению влияния гидродинамических процессов и ветровых условий на характер распространения мутных распресненных вод Калининградского залива в прибрежной зоне Балтийского моря.

Результаты внесены в базу данных явлений по различным регионам наблюдений. Тем самым начато накопление статистики о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости динамических процессов в прибрежной зоне, влияющих на перенос загрязнений.

Для исследования влияния гидрометеорологических, динамических и циркуляционных процессов на перенос загрязнений проведены численные эксперименты по моделированию дрейфа потенциально возможного нефтяного загрязнения вдоль судоходной трассы в Финском заливе, базирующиеся на модели SeatrackWeb (SMHI). Показано, что наибольшей потенциальной опасности нефтяного загрязнения подвергается о. Гогланд, и в меньшей степени - берега нескольких мелких островов на акватории РФ,

острова у берега Финляндии к западу от Хельсинки, а также северный и южный берег РФ в крайней восточной части Финского залива.

Проведена серия подспутниковых экспериментов в юго-восточной Балтике и в северо-восточной части Черного моря.

В рамках проведения подспутниковых измерений на Балтике исследована гидрологическая структура выноса мутных распресненных вод Калининградского канала через Балтийский пролив. Определено влияние ветра и гидродинамических процессов на распространение вод из Калининградского залива, определена трехмерная структура выноса и доказано, что спутниковые изображения, полученные в видимом диапазоне, предоставляют возможность достаточно точно определить область распространения выноса вод из залива. Определены параметры прибрежных течений Балтийского моря у побережья Самбийского полуострова.

Решение задачи определения параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды, влияющих на их распространение во внутренних и окраинных морях России является на сегодняшний день жизненно необходимым. Эти моря наиболее подвержены нефтяному загрязнению из-за широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на морском шельфе, сопровождаемого строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, ростом судоходства и пр., а спутниковый мониторинг является единственным на сегодняшний день реальным и безальтернативным средством оперативного контроля.

## **Краткое описание выполненных в 2015 году работ и полученных научных результатов**

Целью проекта является разработка методов восстановления параметров загрязнения морской поверхности, исследование влияния на их распространение динамических и циркуляционных процессов и определение экологического состояния акваторий морей России на основе комплексного анализа спутниковой информации. Поставленные в проекте задачи решаются на основе использования данных различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические данные многоспектральных и гиперспектральных сенсоров), пространственному разрешению и размерности.

На втором этапе работы над проектом продолжена разработка методов восстановления параметров загрязнения морской поверхности, исследование влияния на его распространение динамических и циркуляционных процессов и определение экологического состояния акваторий морей России на основе комплексного анализа спутниковой информации. Обработка и анализ большого объема спутниковых данных проводилась с использованием инструментария геопортала «SeeTheSea» (STS), созданного и находящегося в эксплуатации в ИКИ РАН.

В ходе выполнения второго этапа проделана следующая работа и получены результаты:

Продолжается непрерывное получение и усвоение в геопортал данных функционирующих на орбите спутников, а именно данных сканирующих радиометров ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8; данные спектрометрических MODIS Terra/Aqua; данные гиперспектрометра HYPERION, установленного на спутнике EO-1.

Расширен набор спутниковых данных для усвоения в систему. Налажено получение данных радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), установленного на новом спутнике европейского космического агентства Sentinel-1 (съемки в штатном режиме начаты в октябре 2014 г.). За отчетный период в STS интегрировано более 7 тыс. РСА-изображений Черного, Балтийского и Каспийского морей. География получения спутниковых данных распространена на северные моря России, в частности Баренцево и Карское моря, кроме того, для этих морей интегрированы в геопортал архивные данные РСА ASAR Envisat за 2005 – 2012 гг. На момент написания отчета архив данных спутниковой радиолокации для Баренцева и Карского моря в системе STS составляет более 8 тыс. изображений.

Начато проведение тематической обработки спутниковых данных для тестовых участков акваторий Баренцева (прибрежная зона Кольского полуострова) и Карского (Карские ворота, устья рек Обь и Енисей) морей с целью феноменологической идентификации различных видов антропогенных и биогенных загрязнений. Начата работа по выявлению основных динамических процессов, имеющих существенное влияние на перенос загрязнений в этих морях.

Проведено усовершенствование алгоритмов различения загрязнений морской среды различного происхождения на основе комплексного использования спутниковой информации, полученной сенсорами, установленными на специализированных спутниках

ДЗЗ. Выявлены преимущества и ограничения использования различных спутниковых данных и их комбинаций в приложении к выявлению нефтесодержащих и биогенных пленок на морской поверхности.

На основе ретроспективного анализа и обобщения результатов комплексного спутникового мониторинга, проводимого в ИКИ РАН в 2009-2012 гг. осуществлено картографирование нефтяных загрязнений морской поверхности Черного и Каспийского морей. Большой объем накопленного экспериментального материала обеспечил статистическую достоверность результатов. Для построения карт нефтяного загрязнения морской поверхности использовался картографический интерфейс, интегрированный в систему STS. Интерфейс обеспечивает доступ к различным картографическим слоям, таким как изолинии глубин, береговые линии, населенные пункты и реки, находящиеся в береговой зоне, государственные границы, судоходные трассы, места добычи нефти на шельфе. Построенные в ходе исполнения проекта карты позволили выявить изменчивость и повторяемость нефтяных загрязнений морской поверхности на различных временных интервалах и на различных пространственных масштабах. Установлено наличие межгодовой и сезонной изменчивости совокупной площади нефтяного загрязнения морской поверхности, определено пространственное распределение нефтяного загрязнения. Выявлены районы, где морская поверхность подвергается наиболее частому загрязнению нефтесодержащими пленками и установлены источники этого загрязнения – сбросы с судов вод, загрязненных нефтепродуктами; проявления естественных выходов углеводородов на морскую поверхность.

Проведен анализ радиолокационных изображений Балтийского моря, полученных в период 2004-2014 г. с целью выявления нефтяных загрязнений в юго-восточной части Балтийского моря. Исследована месячная и сезонная изменчивость количества обнаруженных на спутниковых изображениях нефтяных пятен. Выявлены районы, подверженные наибольшему нефтяному загрязнению, и проведено картирование нефтяных пятен за весь период мониторинга.

Выявлено, что факторами, влияющими на перенос нефтяных загрязнений морской поверхности над континентальным шельфом Черного являются: (1) наличие основного черноморского течения (ОЧТ), способствующего переносу загрязнений по циклонической схеме (скорости в стрежне течения достигают 40-60 см/с, постепенно уменьшаясь как к берегу, так и к открытому морю); (2) интенсивность меандрирования ОЧТ вследствие синоптической изменчивости ветра, в результате чего возможен перенос загрязнений в сторону открытого моря; (3) возникновение вихревых структур разного знака завихренности; (4) присутствие квазистационарного батумского антициклонического вихря.

Показано, что главными факторами, ответственными за растекание, эволюцию и распространение нефтяного загрязнения, постоянно присутствующего в акватории Каспийского моря в районе нефтедобывающего комплекса «Нефтяные Камни», являются локальный ветер и поверхностные течения, достигающие в этом районе скорости до 80 см/с.

При решении задачи прогноза скорости и направления вероятного переноса пленочного загрязнения морской поверхности значительное внимание уделено расчетам по численным моделям. В том числе:

- На основе численной модели Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI) SeatrackWeb ежедневно проводился численный расчет вероятности распространения нефтяных пятен для 5 тестовых районов Балтийского моря, отличающихся повышенной вероятностью нефтяного загрязнения: 1) судоходная трасса в Финском заливе; 2) судоходная трасса, направленная к входу в Калининградский морской канал; 3) район к западу от Самбийского полуострова; 4) нефтяная платформа Лукойла Д-6 в Юго-восточной Балтике; 5) подводный нефтепровод, соединяющий платформу Д-6 с берегом. На момент написания отчета выполнено более 1650 численных расчетов.
- Для наиболее значительных случаев нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных на спутниковых изображениях Черного, Каспийского и Балтийского морей, проведены численные расчеты вероятности распространения нефтяного пятна (траектория движения) с учетом процессов, влияющих на их динамику и массообмен с окружающей средой на основе компьютерной модели FOTS – Floating Objects Tracking System (МГИ РАН, г. Севастополь).
- Для наиболее значительных случаев нефтяных загрязнений, выявленных на спутниковых изображениях морской поверхности юго-восточной части Балтийского моря, на основе численных моделей SeatrackWeb и FOTS проводилось численное моделирование дрейфа и трансформации нефтяных пятен на 48 часов вперед. Проведено сравнение результатов, полученных при расчетах по разным моделям, и выявлены преимущества и недостатки каждой из этих моделей. Было установлено, что при наличии вихревых структур в районе исследования модель FOTS обеспечивала более реалистичный прогноз.

Начата разработка методик определения толщины нефтяной пленки на морской поверхности на основе гиперспектральных данных сенсора Hyperion и NICO и данных сенсоров оптического диапазона высокого и среднего пространственного разрешения.

Продолжено накопление статистики о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости динамических процессов в прибрежной зоне, влияющих на перенос загрязнений.

Отдельное внимание уделено выявлению на спутниковых данных элементов циркуляции вод (меандрирование течений, температурные фронты и апвеллинги, вихревые структуры, струи, фронты и внутренние волны), которые могут влиять на перенос и перераспределение загрязнений, а также способствовать очищению от них водной среды в Балтийском, Черном и Каспийском морях.

Выявлены основные механизмы генерации, формирования и эволюции мезо- и субмезомасштабных вихрей, вихревых диполей в северо-восточной части Черного моря и юго-восточной части Балтийского моря.

Проведено исследование механизмов генерации внутренних волн для всего Черного моря и юго-восточной части Балтийского моря. Привлечение к исследованию спутниковых данных с высоким пространственным разрешением позволило выявить и описать редкую ситуацию возбуждения внутренних волн в море при перемещении нестационарной аномалии атмосферного давления.

Определен вклад различных естественных факторов на концентрацию и распространение взвешенного вещества для пяти специально выбранных тестовых районов. Для акваторий грузинского и придунайского шельфов Черного моря и Гданьского залива Балтийского моря основными факторами, влияющими на распространение взвешенного вещества, являются речной сток и ветровое воздействие, а для мелководных районов Финского залива и вблизи Апшеронского полуострова первостепенное значение имеет ветро-волновое перемешивание в прибрежной зоне.

Проведено картографирование ареалов распространения взвешенного вещества для следующих тестовых районов: в Черном море — акватория, прилегающая к дельте Дуная, северо-восточная и восточная части моря, Финский залив Балтийского моря и акватория Каспийского моря, прилегающая к Апшеронскому полуострову. Картографирование проводилось на основе классификации с использованием специально разработанного инструментария STS. Для каждого полученного класса оценивалась его площадь, а также определялась суммарная площадь ареала распространения взвешенного вещества. Подробно исследована пространственная и временная изменчивость распространения взвешенного вещества на грузинском шельфе Черного моря, выносимого горными реками.

Изучена связь между проявлениями поверхностных пленок биогенного происхождения в спутниковых данных и областями интенсивного цветения водорослей. Исследование базировалось на совместном анализе данных спутниковой радиолокации морской поверхности и данных спутниковых сенсоров оптического диапазона (многоспектральные и гиперспектральные данные).

Проведены 3 серии подспутниковых экспериментов в юго-восточной Балтике, у побережья Крыма и в северо-восточной части Черного моря. Основными задачами натуральных экспериментов являлись: определение параметров прибрежных течений, выявление источников антропогенных и биогенных загрязнений, исследование влияния гидродинамических процессов на распространение загрязнений и верификации спутниковых данных.

Решение задачи определения параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды, влияющих на их распространение во внутренних и окраинных морях России является на сегодняшний день жизненно необходимым. Эти моря наиболее подвержены нефтяному загрязнению из-за широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на морском шельфе, сопровождаемого строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, ростом судоходства и пр., а спутниковый мониторинг является единственным на сегодняшний день реальным и безальтернативным средством оперативного контроля.

Результаты работ по проекту опубликованы в 13 статьях и представлены на семи международных и российских конференциях.

С материалами, посвященными данному проекту, можно ознакомиться на сайте [http://www.iki.rssi.ru/asp/dep\\_proj/proj\\_555.htm](http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_proj/proj_555.htm).