

Лаврова О.Ю.

*К.ф.-м.н., зав. Лабораторией Института космических исследований РАН,
г. Москва, Россия*

Митягина М.И.

*К.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института космических исследований
РАН, г. Москва, Россия*

Костяной А.Г.

*Проф., д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института океанологии
им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия*

*Научный сотрудник Московского университета им. С.Ю. Витте,
г. Москва, Россия*

Lavrova O.Yu.

*Dr., Head of Laboratory, Space Research Institute,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Mityagina M.I.

*Dr., Senior Scientist, Space Research Institute,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Kostianoy A.G.

*Prof., Dr., Chief Scientist, P.P. Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Scientist, S.Yu. Witte Moscow University, Moscow, Russia

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
И ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА
РАСПРОСТРАНЕНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ
И БИОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

**STUDY OF THE IMPACT OF DYNAMIC AND
CIRCULATION PROCESSES ON THE DISTRIBUTION
OF ANTHROPOGENIC AND BIOGENIC SEA
SURFACE POLLUTION ON THE BASE OF
INTEGRATED USE OF SATELLITE INFORMATION**

Резюме. В статье приводится информация о работах по исследованию антропогенных и биогенных загрязнений в морях России на основе использования комплексной спутниковой информации, которые проводятся в ИКИ РАН. Обсуждаются цели и задачи исследований, состояние проблемы, методы и средства, используемые для выполнения работ. Особое внимание уделено ожидаемым результатам, которые будут получены в конце 2016 г.

Ключевые слова: морская поверхность, загрязнения водной среды, экология моря, антропогенные и биогенные загрязнения морской поверхности, перенос загрязнений, спутниковое дистанционное зондирование морской поверхности, волны и вихри в океане, течения, российские моря, Арктика.

Abstract. The article provides information about a research dedicated to the study of anthropogenic and biogenic pollution in the Russian seas on the basis of integrated use of satellite information, performed in Russian Space Research Institute. We discuss the goals and objectives of the project, state of the problem, methods and tools used for implementation of the project. Particular attention is paid to the expected results to be obtained upon completion of the project at the end of 2016.

Keywords: Sea surface, sea water pollution, sea ecology, anthropogenic and biogenic pollution of the sea surface, pollution transport, satellite remote sensing of the sea surface, oceanic waves and eddies, sea currents, Russian seas, Arctic seas.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние морей, омывающих Россию, вызывает обоснованную озабоченность специалистов. Это обусловлено многими причинами: увеличением нефтяного загрязнения вследствие расширения деятельности нефтегазовой отрасли и интенсивности судоходства; повышением концентрации взвешенного вещества в воде, что приводит к увеличению мутности вод и снижению биопродуктивности; аномальным цветением вод, которое с каждым годом охватывает все большие площади, становится более продолжительным и возникает в тех районах, где ранее не наблюдалось. На современном этапе исследование Мирового океана невозможно без использования информации, получаемой с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на

различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. В последнее время во всем мире запущено большое количество спутников с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Точность и разрешающая способность этих приборов постоянно растет, расширяется и набор параметров, характеризующих состояние океанов и морей, которые могут быть измерены из космоса.

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.

Цель проекта согласуется с приоритетными направлениями развития науки и техники в области прорывных технологий для экологии и рационального природопользования, а результат внесет свой вклад в создание технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения. Спутниковый экологический мониторинг морской поверхности включает в себя не только выявление нефтяных, антропогенных и биогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. Прогноз распространения загрязнений возможен только на основе детального знания всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга.

Как показывает наш многолетний опыт спутниковых наблюдений различных районов Мирового океана, задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов, происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда. Разнообразие условий в реальном океане, влияние огромного числа факторов как атмосферного, так и внутриокеанического происхождения, при большой сложности и стоимости натуральных измерений создают

определенную фрагментарность описания реальных процессов, происходящих в конкретных акваториях. Для решения многих практических задач необходимы более 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 времени.

Сложные структуры течений, сопутствующие этим явлениям, проявляются на морской поверхности и могут быть зафиксированы из космоса современными средствами дистанционного зондирования. Все вышеперечисленные факты подтверждают научную значимость решения проблемы, поставленной в данном проекте, который направлен на развитие методов выявления и распознавания антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности и исследование динамических и циркуляционных процессов в морях, влияющих на их распространение, на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования из космоса, что и определяет научную значимость проекта.

Разработка научных основ и методологии количественной оценки экологического состояния морских акваторий и решение задачи определения параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды на основе комплексного анализа спутниковой информации как во внутренних (Черное, Балтийское и Каспийское), так и в окраинных морях (Баренцево, Карское) России является на сегодняшний день крайне актуальной. 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.

В первую очередь речь идет о нефтяном загрязнении морской поверхности, а также о содержании взвешенного вещества и биогенных органических примесей, связанных как с процессом фотосинтеза в фитопланктоне, так и с антропогенно-спровоцированным повышением биологической продуктивности водорослей.

На основе данных спутникового дистанционного зондирования в различных диапазонах будут получены интегральные оценки экологического состояния акваторий. Существенная часть исследований в рамках проекта направлена на изучение влияния динамических и циркуляционных процессов и природных факторов (меандрирование течений, вихревая активность, колебания уровня, стонно-нагонные явления и апвеллинг, температурный и ветровой режимы, осадки, сток рек) на изменчивость пространственно-временных распределений и интенсивность загрязнений морской среды, проявляющихся на спутниковых изображениях.

Важное место в проекте отведено усовершенствованию методик и развитию инструментария для определения типов и масштабов загрязнений, а также для получения их количественных оценок. Отдельное внимание уделяется усовершенствованию алгоритмов распознавания проявлений загрязнений морской среды различного происхождения по данным дистанционного зондирования.

Проект сфокусирован на следующих задачах:

(1) Установление нефтяных загрязнений морской поверхности (как обусловленные антропогенными факторами, так и связанные с естественными выходами нефтеуглеводородов на морскую поверхность);

(2) Определение ареалов распространения взвешенного вещества и зон активного цветения водорослей, выявленных на основе анализа спутниковых данных за последние 10 лет;

(3) Получение статистически достоверной информации о сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости различных типов загрязнений;

(4) Выделение и изучение элементов циркуляции вод, осуществляющих перенос загрязнений и способствующих очищению от них водной среды;

(5) Установление закономерностей динамики распределения загрязнений;

(6) Определение зон экологического риска;

(7) Определение особенностей трансграничного переноса загрязнений в районах морских границ с сопредельными государствами.

Поставленные в проекте задачи решаются для акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей, что определяется, в первую очередь, большим банком данных дистанционного зондирования и измерений *in-situ*, накопленных для этих районов исполнителями проекта в ходе многолетнего спутникового мониторинга. В то же время, эти моря существенно различаются по своим характеристикам и по термогидродинамическим процессам, происходящим в них, что будет способствовать выработке обобщенного подхода, допускающего возможность применения развитых в ходе исполнения методик к различным акваториям Мирового океана. В частности, разработанные методики в первую очередь будут распространены на акватории Баренцева и Карского морей, эта задача отличается высокой актуальностью в связи с интенсивным освоением Арктики, прежде всего, с развитием добычи углеводородов на Арктическом шельфе и интенсификацией судоходства в данном районе Мирового океана.

Масштаб предлагаемой к решению в проекте задачи определяется тем, что область применения решений, найденных в ходе реализации проекта, а также разработанных методик и алгоритмов, чрезвычайно широка. Результаты научно-исследовательской работы, которые будут получены участниками проекта, могут быть использованы для решения одной из важнейших задач океанологии – исследования гидродинамических процессов, для развития методик спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности с учетом локальных гидродинамических процессов. Кроме того, результаты могут быть востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов, Росгидромета и МЧС РФ, и будут полезны для специалистов нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННОЙ ПРОБЛЕМЕ

Первым параметром загрязнения, на оценку которого в течение длительного времени было направлено внимание исследователей, являлось загрязнение морской поверхности нефтесодержащими пленками [1-5]. Развитые учеными методы и технологии начали применяться на практике. Так, например, в Балтийском море ХЕЛКОМ (Хельсинская комиссия) проводит мониторинг и ежегодно публикует сводные карты распределения нефтяных пятен, но только тех, которые были обнаружены авиационным путем, а это всего несколько десятков в год. Значительно больше нефтяных пятен обнаруживается с помощью спутниковых методов, например, в рамках проекта CleanSeaNet, осуществляемого Европейским агентством морской безопасности (European Maritime Safety Agency - EMSA), публикующим сводные карты судовых разливов. Существенным недостатком является то, что в основу составляемых EMSA карт положены алгоритмы автоматического распознавания нефтяных загрязнений на морской поверхности, причем исключительно на основе радиолокационных данных, что значительным образом завышает вероятность ложной тревоги.

Задача детектирования нефтяных пятен на основе радиолокационных изображений морской поверхности до сих пор остается нерешенной. Существует ряд объективных причин, затрудняющих интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений и уверенное выделение на них нефтяных загрязнений, поскольку такие пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, которые принято называть «РЛ-подобиями» пятен. Среди РЛ-подобий нефтяных пятен можно назвать органические пленки, некоторые типы льда, области, затененные сушей, дождевые ячейки, зоны апвеллинга, внутренние волны в атмосфере и океане и т.п. По собственным оценкам EMSA, уровень ложной тревоги в прибрежной зоне достигает 60%. Кроме того, эти карты не составляются для восточных частей Черного и Балтийского морей, и совсем не составляются для Каспийского моря.

Данный проект ставит своей целью оценку нефтяного загрязнения морской поверхности на основе мультисенсорного подхода, т.е. на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности, что существенно повышает достоверность интерпретации спутниковых данных. Применяемые нами методы позволяют не только картографировать, но и проводить оценки уровня загрязненности той или иной акватории.

В Балтийском море ежегодно в июле-августе огромное пространство вод охвачено цветением цианобактерий. Эти цветения воды вызываются в основном двумя видами цианобактерий: *Nodularia spumigena* и *Aphanizomenon flosaquae*. В работе [6] показано, что поскольку скопления цианобактерий находятся либо на поверхности воды, либо в ее непосредственной близости, это обуславливает повышенные значения нормализованной яркости восходящего излучения в этих диапазонах спектра по сравнению с водами, свободными от цианобактерий. Анализ временной изменчивости интенсивности цветения цианобактерий в Балтийском море на основе данных сенсоров CZCS (1979-1984), SeaWiFS и MODIS (1998-2006) был проведен в работе [7]. На основе анализа указанного массива данных в этой работе помимо построения ежегодных кумулятивных карт для каждого пикселя области цветения размером 1 x 1 км была рассчитана частота цветения цианобактерий. В 2002 г. Шведский метеорологический и гидрологический институт разработал систему мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море Baltic Algae Watch System, основанную на обработке данных AVHRR [8]. В результате проведенных исследований для периода 1997-2009 гг. были получены карты числа дней с цветением цианобактерий, карты областей цветения и рассчитана интенсивность цветения.

Взвешенное вещество входит практически во все существующие в настоящее время классификации качества вод, так как является одним из основных элементов в круговороте вещества в природных водоемах. Роль взвесей в водоемах весьма значительна. В частности, следует отметить, что Балтийское море относительно мелководное, поэтому большое количество взвешенного

вещества образуется в результате вертикального перемешивания (взмучивания) при сильном волнении на мелководье. Прозрачность балтийских вод постоянно падает. Так, например, в Северной Балтике она снизилась с 9 м в 1914-1939 гг. до 6 м в настоящее время [9]. Эта же тенденция наблюдается в Южной Балтике и в ряде прибрежных зон. В настоящее время определение взвешенного вещества и цветения вод Балтийского моря проводится прилегающими странами и международными организациями, но недостаточно регулярно и по ограниченным акваториям. Карты пространственного распределения мутности и вероятности цветения вод регулярно делаются Финским институтом окружающей среды, но, к сожалению, только по акватории Финского залива.

Картированием распределения взвешенного вещества и цветения вод в Черном море по отдельным спутниковым изображениям занимается Морской гидрофизический институт (Севастополь, Украина). Картирование нефтяных загрязнений Черного моря производится НИЦ Планета (в российском секторе), авторами проекта (вся акватория) и российскими частными компаниями (акватория Новороссийского порта).

В Каспийском море ни одна из прикаспийских стран (за исключением России) не проводит комплексного спутникового мониторинга акватории моря, поэтому комплексное картирование нефтяного загрязнения, распределения взвешенного вещества и цветения вод проводится только авторами проекта, но пока по серии отдельных спутниковых изображений за ограниченные периоды времени.

Таким образом, на сегодняшний момент можно говорить о фрагментарности и разрозненности существующих наборов карт параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды. Поэтому предлагаемое в проекте сводное картирование нефтяного загрязнения, взвешенного вещества и цветения вод, а также выявление естественных и антропогенных источников этих загрязнений представляет собой задачу, которая еще не была выполнена для Балтийского, Черного и Каспийского морей, но чрезвычайно актуальна в настоящее время. Кроме того, большим преимуществом данного проекта является то, что изменчи-

вость исследуемых параметров будет рассмотрена на длительном (десятилетнем) временном интервале, позволяющем выявить основные тренды, которые могут быть позднее положены в основу прогностических моделей.

Исследованию гидродинамических процессов в океане на основе данных дистанционного зондирования уделяется большое внимание во всем мире. Бурное развитие этих исследований в течение последних лет было в значительной степени стимулировано совершенствованием методов спутникового дистанционного зондирования океана в ИК и видимом диапазонах электромагнитного спектра и доступностью этих данных [10]. Несмотря на усиленное внимание к исследованию гидродинамических процессов, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные процессы, в первую очередь вихри и гидрологические фронты с характерными масштабами 30-100 км, поскольку пространственное разрешение спутниковых сенсоров оптического диапазона, на данных которых базировались исследования, составляет 250 – 1000 м.

Вихревые структуры, мелкомасштабные фронты, струи с характерными масштабами от сотен метров до первых десятков километров изучены значительно слабее. Среди работ зарубежных ученых следует отметить работы американских исследователей [11, 12], которые изучали мелкомасштабные вихревые структуры у берегов Калифорнии. Ряд приоритетных исследований фронтов и мезомасштабных вихрей в Черном и Каспийском морях был проведен коллективом участников проекта из Института космических исследований РАН, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института. Результаты отражены в многочисленных публикациях в отечественных и зарубежных изданиях, а также в трудах международных конференций [13-17].

Использование данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности существенно расширило представления о таком важном явлении, как внутренние волны (ВВ) в океане. Дистанционным наблюдениям распространения внутренних волн в Мировом океане посвящены сотни публикаций, при этом их поток не обнаруживает тенденцию к уменьшению

[10, 18 - 22]. Несмотря на усиленное внимание к исследованию ВВ, наиболее изученными экспериментально и описанными теоретически остаются внутренние гравитационные волны в прибрежных акваториях океанов и приливных морей, возникающие при взаимодействии приливных течений с краем шельфа. Подавляющая часть экспериментальных данных о внутренних волнах неприливной природы получена с помощью контактных методов. Существует ряд работ, посвященных натурным наблюдениям и численному моделированию процессов генерации и распространения короткопериодных внутренних волн в морях без приливов, основанных на данных контактных измерений [23-26]. Публикации, посвященные дистанционным наблюдениям поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов, практически отсутствуют. Участникам проекта принадлежит также приоритет в изучении внутренних волн в Черном, Балтийском и Каспийском морях на основе спутниковых радиолокационных данных. В частности, ими был открыт неизвестный ранее механизм генерации внутренних волн в морях без приливов движущимися холодными вихрями [27].

До сих пор нерешенными остаются вопросы, касающиеся механизмов возникновения мелкомасштабных гидродинамических процессов, районов их проявления, продолжительности существования, их тонкой пространственной структуры, связи с мезомасштабными процессами. Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды и в разных районах, на наш взгляд будет способствовать решению поставленных проблем. До сих пор нерешенной проблемой остается восстановление полей течений по спутниковым изображениям. Относительно неплохие результаты достигнуты при восстановлении глобальных полей течений [28]. Однако задача восстановления локальных течений, являющаяся чрезвычайно важной для прогноза дрейфа нефтяных загрязнений, до сих пор не решена. Использование радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения и применение к ним нового алгоритма восстановления течений [29; 30] позволит значительно продвинуться в этом направлении.

Наиболее глубокие и всесторонние экспериментальные исследования механизмов подавления волн пленками различного происхождения и соответствующей перестройкой спектра поверхностного волнения, а также зависимости модуляции радиолокационных сигналов от наличия пленок различного происхождения на морской поверхности проводятся в ИПФ РАН (Нижний Новгород) [31-33].

Мониторинг нефтяных и антропогенных загрязнений кроме непосредственной идентификации загрязнений, как правило, осуществляемой при помощи данных радаров с синтезированной апертурой (SAR, ASAR), требует получения ряда дополнительной информации о ветре, характеристиках волнения, температуре и структуре поверхностных мезомасштабных течений для описания проявления, трансформации нефтяных пленок и их распространения. В принятой ныне мировой практике при составлении прогноза распространения нефтяного загрязнения на морской поверхности в модель закладываются ветер, волнение и постоянные течения. Наш опыт многолетнего спутникового мониторинга [34] показывает, что помимо этого необходимо учитывать и фактическую мезомасштабную циркуляцию вод, которая имеет огромное влияние на перенос загрязнений.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Основным методом решения поставленных в проекте задач является метод дистанционного зондирования водной поверхности. Метод основан на использовании цифровых данных радиолокаторов, спектрорадиометров, альтиметров, скаттерометров, установленных на зарубежных и российских спутниках и позволяющих получать информацию о поле температуры поверхности моря, взвеси, концентрации хлорофилла, других оптических характеристиках водной поверхности, нефтяном загрязнении, а также об аномалиях уровня моря, ледовом покрытии, изменчивости течений, скорости ветра и высоты волн с высоким пространственным и временным разрешением.

Задача обнаружения и прогнозирования распространения загрязнений различной природы будет решаться на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности (многосенсорный подход). Наиболее важным моментом является разработка методологии комплексного использования данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и размерности.

Экспериментальную основу проекта составляет архив данных, имеющихся в распоряжении участников проекта. К настоящему моменту уже получено более трех с половиной тысяч радиолокационных изображений морской поверхности районов интереса и более тысячи оптических и ИК-изображений. Архив постоянно пополняется. Большой объем экспериментального материала позволит получить статистически достоверные результаты.

Исследования гидродинамических процессов на основе спутниковых изображений высокого разрешения, полученных в разных диапазонах электромагнитного спектра, будут включать в себя:

- усвоение и дальнейшее развитие методик выявления механизмов формирования и эволюции мезо- и субмезомасштабных вихрей, вихревых диполей, струй, фронтов и внутренних волн во внутренних морях;

- совместный анализ всей совокупности данных дистанционного зондирования для получения количественных оценок атмосферных и океанических процессов и явлений;

- усовершенствование методик восстановления с высокой пространственно-временной точностью основных гидродинамических параметров вихревых и волновых структур на основе совместного анализа данных спутниковой радиолокации и синхронных подспутниковых измерений.

Для оценки экологического состояния изучаемых акваторий будет использована разработанная авторами проекта методика комплексирования разнородных данных спутникового дистан-

ционного зондирования морской поверхности. Ниже перечислены типы спутниковых данных, обеспечивающие решение задач обнаружения и прогнозирования распространения загрязнений различной природы:

1. Выявление и распознавание различных типов антропогенных и биогенных загрязнений (ASAR Envisat, SAR ERS-2, сенсоры спутников серии Landsat, гиперспектральные сенсоры Hyperion и NICO).

2. Выявление зон пространственной локализации поверхностных загрязнений пленками углеводородов (ASAR Envisat, SAR ERS-2, сенсоры спутников серии Landsat).

3. Выявление зон пространственной локализации поверхностных биогенных пленок (ASAR Envisat, SAR ERS-2, сенсоры спутников серии Landsat).

4. Определение зон интенсивного цветения фитопланктона (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, гиперспектральные сенсоры Hyperion и NICO).

5. Выявление распространения речного стока в прибрежной зоне морей (ASAR Envisat, SAR ERS-2, оптические данные видимого диапазона MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, гиперспектральные сенсоры Hyperion и NICO).

6. Детектирование явлений, проявляющихся на морской поверхности в поле цветности или температуры поверхности моря и влияющих на перенос взвеси и загрязнений, например, вихревые структуры, температурные фронты и апвеллинги (AVHRR NOAA, MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat).

7. Исследование оптических характеристик морских вод и ареалов распространения взвешенного вещества (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, гиперспектральные сенсоры Hyperion и NICO).

8. Восстановление реального поля скоростей (направление и скорость течений) с пространственным разрешением не ниже 250 м из совместного анализа последовательности спутниковых изображений в оптическом и инфракрасном диапазонах и радио-

локационных данных (ASAR Envisat, SAR ERS-2 , MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat).

9. Восстановление полей температуры поверхности моря на основе изображений в инфракрасном и оптическом диапазонах и использование их для анализа мезомасштабной динамики вод и процессов взаимодействия море-атмосфера (AVHRR NOAA, MODIS Aqua/Terra).

10. Восстановление полей приводного ветра (скорость и направления приводного ветра на высоте 10 м над морской поверхностью) по данным спутниковых скаттерометров.

11. Анализ геострофических скоростей поверхностных течений для оценки и прогноза переноса загрязняющих веществ по акватории на основе спутниковой альтиметрии.

Описанная выше методика позволит выявить изменчивость и повторяемость анализируемых характеристик водной среды на различных временных интервалах (межгодовую, сезонную, месячную, декадную и даже, если понадобится, суточную) и на различных пространственных масштабах. На основе дальнейшего совместного анализа будут установлены причинно-следственные связи и пространственно-временные корреляции анализируемых процессов и явлений.

Поставленные в проекте задачи будут решаться с использованием инструментария, интегрированного в геопортал «See The Sea» (STS), созданный в ИКИ РАН и находящийся в опытной эксплуатации. Геопортал STS предназначен для изучения различных процессов и явлений, происходящих в океане и атмосфере над ним, на основе разнородных данных спутникового дистанционного зондирования. Программный сервис портала STS ориентирован на то, чтобы предоставить исследователю инструментарий, позволяющий визуально детектировать тот или иной процесс или явление, описать его, используя различную комплексную информацию, и сохранить эту информацию в специализированной базе данных для ее дальнейшего анализа. В частности, при выделении нефтяных пятен на радиолокационных изображениях морской поверхности формируется описание конкретного пятна, которое включает в себя: координаты начала и конца сликовой полосы,

связанной с нефтяным загрязнением, координаты центра пятна, совокупную длину сброса, общую площадь загрязнения, факт наличия судна – потенциального источника загрязнения и его координаты на момент съемки.

Вся эта информация, занесенная в специализированную базу данных, будет использоваться для получения различного рода оценок, таких как количество зарегистрированных случаев нелегального сброса с судов загрязненных вод, протяженность сброса, площади загрязнений, примерная оценка объемов (в данном районе, по всему морю, за определенный период и т.п.). Для определения объемов нефтяных загрязнений по данным спутниковой радиолокации будет применяться косвенный подход, в котором по площади пятен на радиолокационном изображении оценивается объем разлива. Для решения этой задачи необходимо знать толщину пленки. Толщина и плотность пленки для получения оценки объема (массы) загрязняющего вещества будут определяться на основе разработанных в ходе исполнения проекта алгоритмов по данным спутникового гиперспектрометра Hyperion и сенсора OLI Landsat 8.

Пространственные характеристики формирования и распространения цветения воды будут восстанавливаться по данным спутниковых спектрорадиометров (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat). Методика детектирования областей интенсивного цветения фитопланктона будет основана на использовании различных комбинаций спектральных каналов видимого диапазона спектра. В частности, детектирование цветения (частично токсичных) сине-зеленых водорослей с помощью данных спектрорадиометров MODIS и MERIS основывается на применении данных зеленого и красного каналов. Сигнал первого из них формируется в результате отражения взвешенными в воде частицами, в т.ч. подповерхностными скоплениями цианобактерий. Сигнал красного участка спектра в большей степени поглощается водой, поэтому его интенсивность определяется отражателями, расположенными в непосредственной близости от поверхности. Таким образом, комбинирование этих каналов делает возможным различение между поверхностными и подповерхностными скоплениями цианобак-

терий. Для сенсора MODIS этими двумя каналами являются 551 и 670 нм, для MERIS – 560 и 665 нм. Интегральная оценка биогенных загрязнений будет состоять в первую очередь в определении пространственной локализации биогенных пленок (идентифицируемых по радиолокационным данным и данным видимого диапазона) и областей интенсивного цветения водорослей (выявляемых по цветосинтезированным изображениям видимого диапазона) и вычислении площади, занимаемой этими загрязнениями.

Определение концентраций взвешенного вещества по спутниковым данным и интегральная оценка взмученности вод будут осуществляться по данным сенсоров MODIS и MERIS. В случае данных MODIS ареалы распространения взвешенного вещества будут определяться по цветосинтезированным изображениям, (комбинация оптических каналов 1-4-3 (RGB)). Отличительной характеристикой спектрометра MERIS является возможность рассчитывать концентрацию общего взвешенного вещества (TSM – Total Suspended Matter) в абсолютных единицах (г/м³) и строить карты с пространственным разрешением 260 м. Будут строиться карты концентрации взвешенного вещества для тестовых районов (Финский залив Балтийского моря, в Черном море — акватория, прилегающая к дельте Дуная, и северо-восточная и восточная части моря), проводиться оценки за разные промежутки времени и изучаться временная изменчивость.

Для определений зон экологического риска будет вычисляться индекс интенсивности покрытия морской поверхности загрязнениями различной природы, рассчитываемый по стандартной методике. Например, для пленочных загрязнений (нефтяных или биогенных) $I = S_{\text{пленки}} / S_{\text{зоны}} \times n$, где: I – индекс пленочных $S_{\text{пленки}}$ – площадь распространения пленок; $S_{\text{зоны}}$ – площадь зоны; n – частота (количество) проявлений пленок. Далее полученный индекс преобразуется в систему баллов условной бонитировочной шкалы. Степень благополучия акваторий наносится на карту цветом в шкале баллов из определенного числа градаций. Зоне с минимальным значением индекса присваивается балл, равный 1, с максимальным индексом – максимальный балл.

Для отдельных наиболее значительных случаев нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных на спутниковых изображениях, будут произведены численные расчеты вероятности распространения нефтяного пятна (траектория движения) с помощью компьютерной модели FOTS (для Черного и Каспийского морей) и по модели Seatrack Web, SMHI для Балтийского моря.

Верификация результатов, получаемых с помощью анализа спутниковой информации, будет проводиться в ходе натурных экспериментов. В рамках эксперимента будет произведен искусственный разлив олеиновой кислоты (либо ее аналогов) на поверхность моря в момент пролета спутников TerraSAR-X и Radarsat-2 с целью выявить закономерности ее распространения при прохождении вихревых структур. РЛИ с высоким пространственным разрешением будут заказываться специально под данный эксперимент. Пленка, образованная на поверхности моря, имитирует поверхностные загрязнения и при соответствующих метеорологических условиях (определенной силе ветра) может быть видна на спутниковых радиолокационных изображениях. Искусственные разливы планируется проводить в момент прохождения субмезомасштабных вихрей, обнаруженных с помощью спутникового зондирования или в ходе измерений акустическим доплеровским профилографом с движущегося судна.

Высокоточный океанологический прибор - акустический доплеровский измеритель течений (ADCP) "WorkHorse Sentinel 300 kHz", приобретен сотрудниками ИКИ РАН специально для осуществления подспутниковых экспериментов. Прибор измеряет трехмерное поле течений, используя эффект Доплера, излучая звук на частоте 300 кГц и принимая эхо, отраженное от рассеивателей звука в воде и от дна. ADCP, помимо данных о течениях, позволяет получать информацию о рассеивателях, которая может быть полезна для изучения пространственной структуры течений и наличия взвеси. Будут составляться подробные описания проведенных исследований, включающие в себя все необходимые сведения для обеспечения возможности воспроизведения их результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исполнения проекта будут получены следующие результаты:

1. Будет составлена представительная выборка радиолокационных, оптических и ИК-изображений, в т.ч., квазисинхронных, для акваторий Черного, Каспийского, Балтийского, Баренцева, и Карского морей за период 2004-2015 гг. и получены на основе развитых в ИКИ РАН методик комплексного анализа спутниковых данных примеры различения нефтяных загрязнений и их радиолокационных подобий иной природы, в т.ч. областей цветения, по данным квазисинхронных наблюдений в различных спектральных диапазонах.

2. Будут развиты усовершенствованные методики целевой обработки и анализа спутниковых изображений с целью выявления загрязнений морской поверхности различной природы, а также различения нефтяных и биогенных пленок на морской поверхности.

3. Будет разработана методика оценки толщины нефтяной пленки на основе гиперспектральных данных и данных сенсоров оптического диапазона высокого пространственного разрешения и проведена апробация для района нефтедобычи Нефтяные Камни в Каспийском море.

4. Будет восстановлена пространственно-временная структура и динамика мезо- и субмезомасштабных динамических процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов), характерных для конкретных акваторий внутренних морей, таких как Черное, Каспийское и Балтийское.

5. Будет установлена межгодовая и сезонная изменчивость и пространственное распределение вихревой и волновой активности в Черном, Балтийском и Каспийском морях.

6. Будут получены интегральные оценки нефтяных загрязнений в Балтийском, Черном и Каспийском морях за 2004-2015 г. (количество зарегистрированных случаев, протяженность сброса загрязненных вод с судов, площади загрязнений, примерная оценка объемов).

7. Будет произведено картографирование основных видов загрязнений для акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей и установлены закономерности динамики распределения загрязнений.

8. Будет получена статистически достоверная информация о влиянии вихревой и волновой динамики на распространение загрязнений и процесс самоочищения вод в тестовых акваториях.

9. Будет восстановлена картина сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости различных типов загрязнений на акваториях Балтийского, Черного и Каспийского морей.

10. Будут определены устойчивые зоны экологического риска, т.е. районы, наиболее подверженные нефтяным загрязнениям, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества на акваториях Балтийского, Черного и Каспийского морей.

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

12. Будет рассмотрена возможность применимости разработанных методик для оценки экологического состояния акваторий Баренцева и Карского морей и проведены первичные оценки их антропогенного загрязнения.

Подобные глубокие и масштабные исследования нигде в мире не проводились. Результаты научно-исследовательской работы, которые будут получены участниками проекта, могут быть использованы для:

- решения одной из важнейших задач океанологии – исследования гидродинамических процессов;

- развития методик спутникового мониторинга антропогенных, в частности нефтяных загрязнений морской поверхности с учетом локальных гидродинамических процессов.

Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях, проводимых в учреждениях и организациях Российской академии наук и Федеральной службы по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды Полученные результаты могут быть также востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов, Росгидромета и МЧС РФ. Они могут быть полезны для специалистов нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей, особенно в морях российской Арктики. Область применения отдельных решений, найденных в ходе реализации проекта, а также разработанных методик и алгоритмов, значительно шире, хотя и с трудом поддается экономическим расчетам.

Дистанционное зондирование Земли из космоса в последние годы претерпевает бурное развитие, что связано со следующими двумя факторами: во-первых, эта область космических технологий является второй, после космической связи, где предвидится существенный коммерческий потенциал; во-вторых, осознанная в последние годы проблема антропогенного влияния на Мировой океан требует создания глобальной сети мониторинга поверхности океана и приповерхностного слоя атмосферы, ключевым элементом которой являются космические средства наблюдения.

Значительные финансовые и технические ресурсы, требуемые для развития такой сети, диктуют необходимость широкой международной кооперации. Для того чтобы войти в эту кооперацию, причем не в качестве только потребителя услуг, необходимо опережающее развитие в России новых технологий и средств дистанционного зондирования, что и является одним из основных аспектов предлагаемого проекта.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00555).

Литература:

- [1] Redondo J.M., A. Platonov, on advances in SAR oceanography A. Tarquis. Detection and prediction from Envisat and ERS missions, 21-25 from SAR multiscale analysis. SeaSAR January 2008., Rome, Italy. 2008 // The 2nd international workshop [2] Topouzelis K., A. Bernardini, G.

- Ferraro, S. Meier-Roux, D. Tarchi. Satellite mapping of oil spills in the Mediterranean Sea // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2006. Vol. 15. N 9A. P. 1009-1014.
- [3] Lu, J. Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in south-east Asia // *International Journal of Remote Sensing*, 2003. V. 24. Issue 15. P. 3013-3032.
- [4] Crocker, R.I.; Matthews, D.K.; Emery, W.J. ; Baldwin, D.G. Computing Coastal Ocean Surface Currents From Infrared and Ocean Color Satellite Imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. No. 2. . P. 435-447.
- [5] Shi L., Ivanov A.Yu., He M.-X., Zhao C. Oil spill mapping in the western part of the East China Sea using synthetic aperture radar imagery // *International Journal of Remote Sensing*, 2008. V.29. N 21. P. 6315-6329.
- [6] Reinart A., Kutser T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea // *Remote Sensing of Environment*, 2006. V. 102(1-2). P. 74–85.
- [7] Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2007. V. 343. P.15-23.
- [8] Hansson M., Hakansson B. The Baltic algae watch system - a remote sensing application for monitoring cyanobacterial blooms in the Baltic sea // *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007. V. 1.
- [9] Hopkins C.C.E. Overview of monitoring in the Baltic Sea // *Report to the Global Environment Facility/ Baltic Sea Regional Project. AquaMarine Advisers*. 2000. 39 p.
- [10] Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // В книге: *Новые идеи в океанологии*. Т. 1. Физика Химия Биология /. Отв. Ред. М.Е. Виноградов, С.С. Лаппо. -М.: Наука, 2004. -С. 55-117.
- [11] DiGiacomo P. M. , Holt B.. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research*. 2001. V. 106. P. 22,521–22,543.
- [12] Marmorino, G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A. Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research*. 2010. V. 115. No. C05010, doi:10.1029/2009JC005863.
- [13] Гинзбург, А.И., Костяной, А.Г., Соловьев, Д.М., Станичный, С.В. Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // *Исследование Земли из космоса*. 2000. №1. С. 3-14.
- [14] Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 5. С.72-79.
- [15] Mityagina, M. I., Lavrova, O. Y., Karimova, S. S. Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. V. 31 No.17. P. 4779- 4790.

- [16] Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248-259.
- [17] Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data // Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR-2010. Ed. ESA. 2010. V. ESA-SP-679. 5 p.
- [18] Alpers, W. Theory of radar imaging of internal waves // Nature. 1985. V. 314. P. 245- 247.
- [19] Zeng, K., Alpers W. Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model // International Journal of Remote Sensing. 2004. V. 25 No. 7-8. P. 1277-1281.
- [20] Apel, J R., Byrne H.M., Proni, J.R., Chmell R.L., Observations of oceanic internal and surface waves Earth Resources Technology satellite//JGR, 1975.V.80, no 6, 865-881.
- [21] Hsu M.-K., Liu A.K., Liu C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR // Cont. Shelf Res. 2000. V. 20. P. 389–410.
- [22] Бондур В.Г., Ю.В. Гребенюк, Е.В. Ежова, В.И. Казаков, Д.А. Сергеев, И.А. Соустова, Ю.И. Троицкая. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 3. Поверхностные проявления внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. №4. С. 1-10.
- [23] Лисиченок А.Д. Интенсивные внутренние волны в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. Сб. научн. тр. Вып. 12. С. 49-60.
- [24] Иванов В.А., Лисиченок А.Д. Внутренние волны в шельфовой зоне и у кромки шельфа в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 67-73.
- [25] Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. С. 648–656.
- [26] Коняев К. В. Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. №3. С. 285-296.
- [27] Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
- [28] Chapron, B., Collard F., Arduhin F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation, Journal of Geophysical Research. 2005, V. 110. No.C07008. doi:10.1029/2004JC002809.
- [29] Seppke B., Gade M., Dreschler-Fischer L. Evaluation of high-resolution sea surface current fields in the baltic sea derived from multi-sensor satellite imagery // Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2010.
- [30] Seppke B., Gade M., Dreschler-Fischer L. The use of spatial constraints

in the derivation of mesoscale sea surface current fields from multi-sensor satellite data // Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2010). P. 2226-2229.

[31] Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Пленочный механизм воздействия внутренних волн на ветровую рябь. В сб. Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький: ИПФ, 1982. С.31-51.

[32] Ермаков С.А., Панченко А.Р., Талипова Т.Г. Подавление высокочастотных ветровых волн искусственно-

созданными поверхностными пленками // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. С. 76-82.

[33] Ermakov, S.A., I.A. Sergievskaya, E.M. Zuikova, Yu.B. Shchegolkov, J.C. Scott, and N.R. Stapleton. Field Observations of Radar Backscatter Modulation and Radar Doppler Shifts in Slicks. Proceedings of the 2000 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. V. IV, P. 1513-1515.

[34] Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.