### Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности

### О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, И.А. Уваров, Е.А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: olavrova@iki.rssi.ru, smis@smis.iki.rssi.ru

Информационная система See the Sea (http://ocean.geosmis.ru) разработана в ИКИ РАН для обеспечения учёных, проводящих исследования в области океанологии, возможностями распределённой работы со спутниковыми, метеорологическим и другими данными, накопленными в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/). Система обеспечивает доступ не только к многолетним, постоянно пополняющимся архивам данных, но и к инструментам для их онлайн-анализа. Специализированная подсистема описания обнаруженных явлений позволяет накапливать, объединять и систематизировать знания, полученные в результате работы группы исследователей. Для описания явлений, которые могут быть обнаружены на морской поверхности, создан таксономический классификатор. Настоящая статья посвящена анализу текущих возможностей информационной системы See the Sea и опыта её использования для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности. Также обсуждаются перспективы развития информационной системы, направленные в первую очередь на расширение состава данных, работу с которыми она обеспечивает (в том числе на организацию работы с данными, получаемыми с буёв Агgo, и спутниковой альтиметрии), и создание новых инструментов их обработки и анализа.

**Ключевые слова:** информационная система, ЦКП «ИКИ-Мониторинг», спутниковые данные, Мировой океан, радиолокационные изображения, нефтяные загрязнения морской поверхности, гидрофизические процессы, вихри, внутренние волны, речные плюмы

> Одобрена к печати: 26.06.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287

#### Введение

Информационная система See the Sea (STS, http://ocean.geosmis.ru) разработана в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) в 2011 г. STS является одной из специализированных систем работы с данными, предоставляемых центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) (Лупян и др., 2015, 2019). Основным назначением системы является обеспечение исследователей возможностями доступа и инструментами анализа информации, полученной на основе данных спутниковых наблюдений (как оперативных, так и из накопленных архивов), для изучения различных процессов, происходящих в океане и атмосфере над ним. Достаточно подробно основные возможности системы описаны, в частности, в работах (Лупян и др., 2012; Loupian et al., 2018; Mityagina et al., 2014).

За время существования системы в ней было создано значительное число инструментов обработки и анализа данных, необходимых для исследования океанологических процессов и явлений, происходящих в Мировом океане, в том числе для изучения течений, выносов рек, нефтяных загрязнений, ледовой обстановки. Система позволяет выполнять проведение совместного комплексного анализа различных видов спутниковой и гидрометеорологической информации. В STS реализована также возможность описания процессов и явлений, происходящих в Мировом океане, и ведения долговременных баз данных таких описаний. Основной особенностью системы является то, что она обеспечивает исследователям возможность распределённой работы с информацией с использованием для её обработки вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Имея доступ к интернету и стандартный браузер, пользователи могут работать с системой, находясь в любом месте. При этом они получают онлайн-доступ к сверхбольшим, постоянно пополняющимся архивам данных ЦКП

«ИКИ-Мониторинг», общий объем которых на начало июня 2019 г. превышал 2,5 ПБайт. У исследователей нет необходимости иметь у себя специализированное, часто дорогостоящее, программное обеспечение для обработки спутниковых данных. Использование инструментария информационной системы STS позволяет достаточно эффективно решать различные научные и прикладные задачи, связанные с исследованием океана.

Настоящая статья посвящена описанию текущих возможностей системы и опыту её использования для решения различных задач. В ней также обсуждаются перспективы развития системы.

# Особенности построения системы STS и входящие в неё основные данные

Информационная система STS создавалась с использованием разработанных в ИКИ РАН технологий работы со сверхбольшими распределёнными архивами спутниковых данных и результатами их обработки, входящими в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Подробное описание архитектуры STS и принципы её построения представлены в работе (Лупян и др., 2012).

Основным элементом системы STS является веб-сервер, обеспечивающий доступ пользователей к данным и результатам их обработки, а также инструментам анализа данных. В составе веб-сервера на основе разработанной в ИКИ РАН технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011) реализован картографический интерфейс, обеспечивающий возможность работы с пространственной информацией. Он позволяет не только визуализировать данные, но и управлять различными процедурами их анализа и обработки, которые осуществляются с использованием распределённых вычислительных ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Вид этого интерфейса приведен на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Пример результата проведения классификации типов водной поверхности в STS. Керченский пролив, данные прибора MSI 04.05.2019

В состав системы также входит сервер баз данных, предназначенный для хранения различной специализированной информации. К такой информации относятся, например, данные о движении буёв ARGO, сведения о движении морских судов, полученные с помощью Автоматической идентификационной системы (АИС), и что самое главное — информация, накопленная в результате исследований.

В STS доступны все спутниковые данные и результаты их обработки, имеющиеся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг». С текущим состоянием этих архивов можно познакомиться по адресу http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6.

В системе предусмотрена работа со спутниковыми данными, полученными в радио-, видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра.

Данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA). Особое внимание в системе уделяется работе с радиолокационными спутниковыми данными, которые являются основой для изучения процессов и явлений на морской поверхности и в атмосфере над ней.

В STS были интегрированы архивные данные приборов SAR ERS-1/2 и ASAR Envisat, накопленные в лаборатории Аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН за период 1995—2012 гг. Эти данные были получены в рамках различных научных проектов, поддерживаемых Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA). Архив содержит около 11 000 сцен, покрывающих в первую очередь акватории Чёрного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей.

Данные радиолокаторов ИСЗ Sentinel-1А и Sentinel-1В поступают в STS с октября 2014 г. и октября 2016 г. соответственно. На начало июня 2019 г. в системе было доступно более 900 000 сцен этих приборов. Охват территории существенно расширился, в частности, в STS доступны радиолокационные изображения (РЛИ), полученные над морями российской Арктики.

Спутниковые данные видимого и ИК-диапазонов. В STS данные видимого и ИК-диапазонов разделяются на два условных типа, исходя из пространственного разрешения. К первому типу относятся данные среднего и низкого разрешения (от 100 м до 1 км), полученные приборами AVHRR NOAA, MODIS, VIIRS, OLCI/SLSTR, MCУ-MP. Данные этих приборов могут использоваться для определения различных характеристик морской поверхности, таких как цветность и температура воды, ледяной покров, содержание взвешенного вещества и концентрация хлорофилла *а*. Архив данных AVHRR NOAA и MODIS Terra/Aqua ведётся с 2000 г., информация с остальных спутников оперативно поступает в STS практически с момента введения их в эксплуатацию.

Ко второму типу относятся данные высокого пространственного разрешения (10–60 м), полученные приборами, установленными на спутниках серии Landsat, Sentinel-2 и «Метеор-М». На основе таких данных возможно, помимо перечисленного выше, более детально изучать процессы и явления на поверхности моря.

В STS накоплен также архив данных спутниковых гиперспектрометров Hyperion и HICO. Такие приборы играют особую роль, поскольку гиперспектральные данные позволяют детально различать типы водной поверхности благодаря наиболее подробной передаче спектральных характеристик наблюдаемого объекта. Следует отметить, что съёмка прибором HICO проводилась по заказу ИКИ РАН в рамках совместного договора с Naval Research Laboratory (NRL).

В настоящее время организованы поступления в архивы ЦКП и, соответственно, обеспечен доступ в STS специализированных информационных продуктов, получаемых на основе спутниковых данных, таких, например, как температура поверхности моря и индекс Floating Algae Index (FAI) для исследования водорослей на водной поверхности.

Метеорологические данные интегрированы в систему STS для совместного анализа со спутниковыми изображениями при исследовании морских процессов и явлений. Они формируются на основе модели NCEP Climate Forecast System Version 2 (https://rda.ucar.edu/datasets/ ds094.0/). Предусмотрена работа с такими метеопараметрами, как температура воздуха, количество осадков, относительная влажность, атмосферное давление, облачность, нисходящие и восходящие потоки солнечной радиации, скорость и направление ветра (Уваров и др., 2013).

**Географическая основа** включает ряд векторных слоёв, используемых для визуализации данных. В их числе: береговая линия, карты глубин, гидрография суши.

See the Sea — открытая система. Предусмотрена возможность интегрирования в нее данных новых сенсоров вновь запускаемых спутников. Базы данных атмосферных и океанологических процессов и явлений. Как уже отмечалось, одной из особенностей системы STS является то, что в ней сформированы базы данных (БД) различных явлений и процессов в океане и атмосфере над ним, выявленных в данных спутникового зондирования Земли. БД формируются и постоянно пополняются в процессе аннотирования конкретного спутникового изображения. Интерпретирование осуществляется экспертом и проходит неоднократную проверку. Пример интерпретации РЛИ ASAR Envisat, полученного 5 июня 2011 г. над акваторией юго-восточной части Балтийского моря, представлен на *рис. 2.* Данное изображение попадёт в семь БД в соответствии с отмеченными явлениями: атмосферные внутренние волны, запрепятственные потоки в атмосфере, цветение водорослей, нитевидные слики, вихри океанические, ветровая тень, ветровые полосы. В настоящее время создано 37 БД явлений и процессов.



*Рис. 2.* Пример окна в STS для интерпретации РЛИ ASAR Envisat, полученного 05.06.2011 над акваторией юго-восточной части Балтийского моря

Ниже приведены примеры тематических баз данных.

БД наблюдений нефтяных загрязнений Чёрного моря.

Задача: выявление пространственно-временной изменчивости и количественных оценок нефтяного загрязнения в результате сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты.

Район: акватория Чёрного моря, вдоль основных судоходных трасс.

Период: 2004 г. – настоящее время.

Используемые данные: SAR ERS-1/2 (247 сцен), ASAR Envisat (680 сцен), SAR-C Sentinel-1A, Sentinel-1B (более 1500 сцен).

Зарегистрированные события: ежегодно более 200 сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты.

БД наблюдений нефтяных загрязнений Каспийского моря.

Задача: оценка угрозы окружающей среде со стороны нефтедобычи.

Район: нефтяные месторождения в Северном и Среднем Каспии.

Период: 2003 г. – настоящее время.

Используемые данные: ASAR Envisat, SAR Sentinel-1A, -1B, OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2A, -2B.

Зарегистрированные события: нефтяные загрязнения различной площади.

БД наблюдений естественных нефтяных выходов в Чёрном море.

Задача: определение районов локализации естественных выходов нефтеуглеводородов с морского дна на поверхность Чёрного моря.

Район: восточная часть акватории Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии.

Период: 2010–2011, 2015 гг. – настоящее время.

Используемые данные: ASAR Envisat, SAR-C Sentinel-1A, -1B, OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2A, -2B.

Зарегистрированные события: совокупная площадь загрязнений от 522 до 745 км<sup>2</sup>.

БД наблюдений «цветения» водорослей в Балтийском море.

Задача: мониторинг экологического состояния Балтийского моря.

Район: Балтийское море.

Период: 2009 г. – настоящее время.

Используемые данные: ASAR Envisat, SAR-C Sentinel-1A, -1B, OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2A, -2B, MODIS Terra/Aqua.

Зарегистрированные события: на РЛИ в областях интенсивного «цветения» водорослей наблюдается скопление биогенных плёнок.

Подобные тематические БД формируются под конкретные проекты и задачи. Помимо перечисленных выше созданы БД поверхностных проявлений внутренних волн, субмезомасштабных вихрей, плюмов рек в Чёрном, Балтийском и Каспийском морях и т.д.

### Возможности работы с данными

Поиск данных является отправной точкой исследования и подчиняется множеству критериев: качественных, временных, пространственных. Данные сгруппированы в разделах интерфейса («вкладках») по типам. Поиск спутниковой информации учитывает такие параметры, как период и район наблюдений, наличие тематических продуктов обработки, количество облачности (для оптических данных), поляризация (для радиолокационных) и др.

Подготовка спутниковых данных к работе — неотъемлемый этап исследования. Это связано с тем, что возможность обнаружения тех или иных явлений во многом зависит от параметров визуализации. Применительно к радиолокационным данным, имеющим по своей природе большой перепад величин измеренной интенсивности сигнала, подбор подходящей передаточной функции принципиально важен для контрастного отображения наблюдаемого явления. Также предусмотрено использование цветового синтеза поляризаций. Настройка параметров визуализации актуальна и для изображений оптического диапазона. Выбор информативных спектральных каналов и яркостная коррекция позволяют подготовить изображение для наблюдения и интерпретации явлений. Особенно следует отметить возможность цветового синтеза разных изображений, будь то разновременные или полученные разными системами снимки.

Основным специализированным исследовательским инструментом STS является подсистема описания явлений. Она призвана накапливать, объединять и систематизировать знания, полученные в результате работы группы исследователей. Для описания явлений, которые могут быть обнаружены на морской поверхности, создан таксономический классификатор. Обнаружение исследователем явления предусматривает добавление записи в базу данных. При этом происходят следующие операции с данными:

- участок обнаружения явления регистрируется как графический элемент, на карту наносится контур распространения явления;
- явлению присваиваются атрибуты в соответствии с классификатором;
- определяются количественные характеристики объекта;

- изображение, на котором обнаружено явление, маркируется в соответствии с классом явления;
- с изображением ассоциируется его общее описание.

Такой подход к организации работы позволяет впоследствии выполнять поиск по базе данных зарегистрированных явлений определенного типа в заданных регионе и промежутке времени, проводить статистическую обработку, строить карты пространственного распределения зарегистрированных явлений. Примеры таких карт будут приведены ниже. По каждому зарегистрированному явлению можно также получить различную информацию, входящую в его описание, в том числе исходные спутниковые данные, на которых были обнаружены явления заданного типа.

В системе реализована возможность классификации изображений на основе их спектрально-яркостных характеристик в режимах как обучаемой, так и необучаемой классификации. Это позволяет автоматизированным образом получать карты распространения поверхностных явлений и карты разных типов водной поверхности.

Специализированный инструмент реализован для работы с гиперспектральными данными. Для заданных объектов наблюдения на водной поверхности, а также для групп таких объектов возможно построение спектральных профилей в виде графиков. Это позволяет определить характерные особенности спектральных характеристик качественно различающихся типов поверхности и, таким образом, выявить наиболее информативные участки электромагнитного спектра. Информативные каналы гиперспектрометра впоследствии могут быть использованы для проведения классификации и построения карт.

### Опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности

### Мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности, связанных с судовыми сбросами

Одна из первых задач, которая решалась с использованием информационной системы STS, — это выявление и картирование антропогенных загрязнений морской поверхности, связанных со сбросом с судов вод, содержащих нефтепродукты. Исследования проводились в первую очередь для акваторий Чёрного, Балтийского и Каспийского морей, а также западной части российской Арктики. На основе полученных данных были определены масштабы подобного рода загрязнений и установлены связанные с ними зоны экологического риска (Лаврова и др., 2016). Как было выявлено в результате мониторинга, наиболее неблагоприятная обстановка наблюдается в Чёрном море. Это вызвано, прежде всего, тем, что для Чёрного моря не существует межгосударственной программы по контролю нефтяных загрязнений, как это, например, имеет место для Балтийского моря в рамках Хельсинкской комиссии. В то же время на Чёрном море год от года увеличивается транспортировка судами нефтепродуктов, строятся и вводятся в эксплуатацию новые нефтеналивные терминалы в портах всех причерноморских стран.

Мониторинг нефтяных загрязнений с судов для акватории Чёрного моря регулярно проводится в ИКИ РАН, начиная с 2003 г. Он базируется в первую очередь на данных спутниковой радиолокации, полученных сенсорами SAR ERS-1/2 (495 сцен), ASAR Envisat (1463 сцены), SAR-C Sentinel-1A (более 7500 сцен) и Sentinel-1B (более 4000 сцен). С 2012 г. он проводится с использованием информационной системы STS, в которую были внедрены не только все архивные данные спутниковой радиолокации, накопленные в ИКИ РАН в рамках различных научных проектов, но также, что является самым главным, все подробные описания радиолокационных изображений. Эта информация стала основой базы данных явлений, в частности проявлений нефтяных загрязнений с судов. Дальнейшее наполнение этой базы осуществляется на основе оперативных данных, получаемых сенсорами SAR-C Sentinel-1A, -1B.

В целях уменьшения уровня ложной тревоги при идентификации нефтяных загрязнений морской поверхности, т.е. различения собственно нефтяного загрязнения и явлений и процессов, имеющих схожие радиолокационные образы (Лаврова и др., 2011), по возможности использовались также квазисинхронные спутниковые данные, полученные в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах сенсорами TM/ETM+/OLI Landsat-5, -7, -8, MODIS Aqua/Terra, MSI Sentinel-2, и метеорологические данные о состоянии поля ветра.

С помощью STS проведено картографирование поверхностных загрязнений, обусловленных сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты, для всей акватории Чёрного моря. С использованием подсистемы создания и ведения описаний различных типов изучаемых явлений сформированы массивы описаний случаев нефтяного загрязнения морской поверхности в результате судовых сбросов, сохранённые в специализированной базе данных. Для каждого случая нефтяного загрязнения на морской поверхности в базу данных заносились: координаты начала и конца сликовой полосы и/или координаты центра пятна, совокупная длина сброса, общая площадь загрязнения, факт наличия судна — потенциального источника загрязнения и его координаты на момент съёмки. Сохранённая информация использовалась для получения различного рода оценок, таких как количество зарегистрированных случаев нелегального сброса с судов загрязнённых вод, протяжённость сброса, площади загрязнений, примерная оценка объёмов (в данном районе, по всему морю, за определённый период и т.п.).



*Рис. 3.* Обобщённая карта-схема нефтесодержащих судовых сбросов в Чёрном море, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг. (*a*); распределение индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен (б); межгодовая изменчивость площади нефтяного загрязнения в 2009–2011 и 2015–2016 гг. (*в*)

На основе спутниковых данных подтверждено, что нефтесодержащие загрязнения морской поверхности концентрируются вдоль основных судоходных трасс Стамбул – Новороссийск, Стамбул – Керченский пролив, Стамбул – Одесса и Стамбул – Туапсе. Кроме того, большое количество сбросов происходит вблизи крупных портов и входов в Босфор и Керченский пролив. Нефтяные загрязнения морской поверхности в результате судовых сбросов вдоль основных судоходных трасс являются наиболее многочисленными и зачастую отличаются большими размерами. В качестве примера на *рис. За* (см. с. 272) представлена обобщённая карта-схема нефтяного загрязнения Чёрного моря, выявленного по данным спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг.

Пример гистограммы распределения индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен, обусловленных судовыми сбросами, приведён на *рис. 36*. В 80 % случаев площадь загрязнения не превосходит 5 км<sup>2</sup>, а около 40 % выявленных пятен имеют размер не больше 1 км<sup>2</sup>. Однако зачастую суда производят многократные сбросы загрязнённых вод на протяжении десятков километров, и площадь растёкшейся плёнки может достигать нескольких десятков квадратных километров. Пример количества выявляемых ежегодно пятен и их совокупной площади приведён на *рис. 36*.

Основные результаты исследований, проведённых с использованием информационной системы STS и направленных на выявление пространственно-временной изменчивости и получение количественных оценок нефтяного загрязнения поверхности Чёрного моря в результате сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты, представлены в работах (Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2016; Митягина и др., 2015; Mityagina, Lavrova, 2012, 2016).

#### Мониторинг естественных выходов нефтеуглеводородов с морского дна на поверхность Чёрного моря

Источниками поступления нефтеуглеводородов в море являются судоходство, добыча углеводородов в акваториях, буровые платформы, аварийные разливы, нефтеперерабатывающие предприятия, сточные воды, приводящие к антропогенным нефтяным загрязнениям, а также линзы углеводородов в толще грунта, которые являются естественными, или природными, нефтяными загрязнениями.

Мониторинг естественных выходов нефтеуглеводородов со дна на поверхность Чёрного и Каспийского морей проводится с использованием информационной системы STS начиная с 2012 г.

В частности, нами было выполнено исследование, направленное на выявление пространственно-временной изменчивости и оценку рисков нефтяного загрязнения морской поверхности в результате естественных выходов нефтеуглеводородов в грузинском секторе Чёрного моря в районе Поти-Батуми и на турецком шельфе вблизи г. Ризе. Работа проводилась на основе обобщения и анализа многолетних рядов данных спутниковых радиолокаторов ИСЗ Envisat (до 2012 г.) и ИСЗ Sentinel-1A, -1B (начиная с октября 2014 г. и октября 2016 г. соответственно). Кроме того, были привлечены данные многоспектральных сенсоров оптического диапазона MSI ИСЗ Sentinel-2A, сканирующих радиометров ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8, спектрорадиометров MODIS ИСЗ Terra/Aqua.

С помощью инструментария спутникового сервиса STS проведён анализ всех радиолокационных изображений акватории Чёрного моря, полученных в районах интереса за период январь 2009 г. – декабрь 2018 г., что составило 1580 сцен для района Поти-Батуми и 1060 сцен для района турецкого шельфа. По спутниковым данным идентифицированы 405 нефтепроявлений вблизи точки выхода на грузинском шельфе и 268 нефтепроявлений на турецком шельфе.

Использование инструментария и картографического интерфейса сервиса STS позволило на основе спутниковых изображений идентифицировать источник просачивания углеводородов с морского дна в юго-восточной части Чёрного моря в районе турецкого шельфа и уточнить его координаты, соответствующие повторяющейся точке всплытия детектированных нефтепроявлений (Mityagina, Lavrova, 2017). Статистическая достоверность полученных результатов обусловлена большим объёмом проанализированных данных. На *рис.* 4 приведён пример нескольких нанесённых на карту нефтепроявлений, зарегистрированных в разные годы, сезоны и дни, имеющих единую точку всплытия. Координаты  $40^{\circ}41'$  в.д.,  $41^{\circ}09'$  с.ш., соответствующие повторяющейся точке всплытия, определяют местоположение источника углеводородов на морском дне на глубине 1000 м и на расстоянии около 5 км от береговой черты.



*Puc. 4.* Пример использования данных спутниковой радиолокации морской поверхности для уточнения местоположения источника углеводородов на морском дне

С помощью картографического интерфейса построены карты, позволяющие оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности вблизи естественных выходов нефти на поверхность юго-восточной части Чёрного моря (*puc. 5*).



*Рис. 5.* Обобщённая схема естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Чёрного моря, выявленных по спутниковым данным

Общая площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, в районе Поти-Батуми составляет около 4500 км<sup>2</sup>. Площадь, подверженная нефтяному загрязнению с вероятностью более 50 %, — 1000 км<sup>2</sup>. Примерно 180 км<sup>2</sup> акватории имеют очень высокий риск загрязнения.

Определённая по спутниковым данным интегральная площадь нефтяного загрязнения в 2017 г. составляла 1235 км<sup>2</sup>, а в 2018 г. она увеличилась более чем в полтора раза до 2083 км<sup>2</sup>. Свыше половины всех выявленных нефтепроявлений имеют площади, превышающие 10 км<sup>2</sup>, а более чем в 30 % случаев индивидуальные площади нефтепроявлений превосходят 20 км<sup>2</sup>. На основе спутниковых данных установлено также, что в этом районе нефтяные плёнки естественного происхождения могут распространяться при умеренных ветрах на расстояния до 50 км от точки всплытия и сохраняться на поверхности вплоть до 48 ч, являясь индикатором для выявления структуры поверхностных течений в районе интереса. Дрейф нефтяных плёнок на морской поверхности в шельфовой зоне грузинского сектора Чёрного моря определяется, прежде всего, неустойчивой системой течений. Здесь с высокой степенью вероятности может происходить кросс-шельфовый перенос нефтяного загрязнения.

В районе турецкого шельфа ежегодная интегральная площадь нефтепроявлений варьирует в пределах  $320-350 \text{ km}^2$ , межгодовая изменчивость не превышает 10 %. Более половины всех выявленных в этом районе естественных нефтепроявлений имеют площади менее 5 км<sup>2</sup>. Были идентифицированы и пятна с площадью более 15 км<sup>2</sup>, однако их доля не превышает 10 %. Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, у турецкого шельфа составляет около 450 км<sup>2</sup>. Площадь, подверженная загрязнению с вероятностью более 50 %, — 150 км<sup>2</sup>. Примерно 50 км<sup>2</sup> акватории имеют высокий риск загрязнения. В этом районе преобладает вдольбереговое направление переноса загрязнений, однако тот факт, что точка всплытия находится на расстоянии около 5 км от берега, существенно повышает риски загрязнения побережья.

Основные результаты мониторинга естественных выходов нефтеуглеводородов с морского дна на поверхность Чёрного моря, проведенного с использованием информационной системы STS, представлены в работах (Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2016; Митягина, 2018; Митягина и др., 2015; Mityagina, Lavrova, 2016, 2017).

#### Мониторинг речных плюмов

Попадая из реки в море, материковые воды образуют прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и температурой, отличной от окружающей, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе принято называть плюмами (Завьялов и др., 2014). Поскольку речные плюмы сильно отличаются от окружающих их морских вод своими оптическими свойствами, для восстановления пространственной картины распространения речных вод в море нами использовались спутниковые данные, полученные в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Объектами исследования являлись плюмы рек восточной части Чёрного моря, а также Кубани, Вислы, Дуная, Роны и выносы вод в Балтийское море из Куршского и Вислинского заливов.

На цветосинтезированных изображениях высокого пространственного разрешения видимого диапазона, полученных, например, с помощью MSI Sentinel-2A, -2B и OLI Landsat-8, как правило, хорошо выделяются три основные области плюма, которые различаются мутностью и, соответственно, цветностью. Первая — непосредственно примыкающая к устью реки — содержит основное количество речных наносов, состоящих в первую очередь из песка. Это область маргинального фильтра (Лисицын, 1994). Принято считать, что в среднем для рек мира в этой зоне откладывается 93–95 % от взвешенных и 20–40 % от растворённых веществ речного стока, включая загрязнения. На изображениях в «естественных» цветах первая область проявляется различными оттенками от серого и бежевого цветов до тёмно-коричневого. Вторая область, окаймляющая первую, содержит мелкодисперсные алевритовые

и пелитовые непляжеобразующие фракции. Она проявляется оттенками от жёлто-зелёного, до светло-зелёного. И наконец, третья область может распространяться на большие расстояния и не иметь ярко выраженной границы. Это область плёночных загрязнений, связанных с речным стоком, или содержащая частицы, размер которых менее 0,001 мм (илистые частицы). Выделение каждой из этих трёх областей выполнялось с использованием включённого в информационную систему STS инструмента для проведения классификаций. Этот инструмент позволяет проводить достаточно сложную обработку данных с целью разделения спутникового изображения на отдельные классы по определённым параметрам. Доступны методы с обучением и без обучения. Реализованные алгоритмы классификации составлены из модулей GRASS GIS (Neteler et al., 2012). Для выделения областей с различной мутностью использовалась классификация без обучения, выполняемая в два этапа: расчёт сигнатур и собственно классификация методом максимального правдоподобия, который базируется на автоматической кластеризации объектов по признаку схожести спектральных характеристик. Все пиксели, имеющие сходные спектральные характеристики, объединяются в один класс. Число выделяемых классов задаётся пользователем. Для выделения трёх областей, различающихся по концентрациям взвешенного вещества, сначала использовалась классификация по пяти – семи классам, которая, как правило, объединяла взмученную область в один класс, затем в рамках данного класса проводилась повторная классификация по трём классам. Полученный результат достаточно хорошо соответствует той картине, которая наблюдается на цветосинтезированном изображении в «естественных» цветах. В качестве примера на *рис.* 6 приведено цветосинтезированное изображение ETM+ Landsat-7 плюмов рек в восточной части Чёрного моря (см. рис. ба) и результат классификации (см. рис. бб). Приведённый пример демонстрирует высокую степень достоверности выделения трёх областей речных плюмов с помощью инструмента «классификация».



a

б

Рис. 6. Пример использования инструмента «классификация» для выделения трех основных областей плюмов рек в восточной части Черного моря: *а* — фрагмент цветосинтезированного изображения Landsat-7 ETM+ от 8 июля 2005 г., 07:45 GMT. Стрелки указывают на три области плюма, различающиеся количеством взвешенного вещества; *б* — результат классификации по трём классам. Красный цвет соответствует области 1, жёлтый — области 2, зелёный — области 3. Прямоугольник отмечает положение фрагмента, представленного на *рис. 6a* (Lavrova et al., 2015)

Одна из важнейших задач — это картографирование ареалов распространения взвешенного вещества и определение площадей с наибольшей его концентрацией. При проведении мониторинга распространения речных плюмов в системе STS автоматически определялась площадь каждого полученного класса (области), а также суммарная площадь речного выноса. На *рис.* 7 приведён пример карты, полученной по результатам многолетнего мониторинга плюмов рек, впадающих в восточную часть Чёрного моря (от Риони до Чорохи) за период 2000–2015 гг. Оценка площадей делалась для двух областей — первой и третьей. Максимальная площадь первой области (ближайшей к устью, с максимальной концентрацией взвешенного вещества) составила 175 км<sup>2</sup>. Такие размеры характерны для марта апреля и встречаются в ноябре, т.е. когда вынос наносов всех рек является наибольшим. Максимальная общая площадь акватории, по которой распространяется взвешенное вещество, достигается в апреле – мае — 2200 км<sup>2</sup>.



*Рис.* 7. Области, соответствующие максимальному распространению взвешенных веществ в восточной части Чёрного моря: зелёная линия отмечает границу наибольшего распространения области 3, красная — области 1 согласно классификации, описанной в тексте (Лаврова и др., 2016)

Подобные оценки делались для всех исследуемых приустьевых районов. Результаты классификации позволили также провести статистический анализ и построить гистограммы распределения индивидуальных размеров плюмов разных рек и выносов в море лагунных вод.

Более подробно результаты использования информационной системы STS для изучения плюмов речных и лагунных вод описаны в публикациях (Лаврова и др., 2016; Назирова и др., 2019; Щеголихина, Лаврова, 2018; Lavrova et al., 2015, 2016)

# Восстановление скорости распространения гидрофизических процессов по серии спутниковых изображений

Одна из важнейших задач, которая возникает при изучении гидрофизических процессов, происходящих в морях и океанах, — это определение скорости и направления их распространения. Основываясь на единичном спутниковом изображении, решить такую задачу практически невозможно.

В настоящее время на околоземной орбите находится большое количество приборов дистанционного зондирования, предоставляющих информацию в различных диапазонах электромагнитного спектра. Доступность этих данных для научных исследований, высокое пространственное (порядка 10 м) и временное (от нескольких минут до нескольких часов между съёмками одного и того же района) разрешение позволяют определять не только пространственные, но и динамические характеристики процессов и явлений, таких, например, как вихри, внутренние волны, речные выносы, гидрологические фронты.

Оценка скорости и направления распространения таких гидродинамических процессов проводилась нами с помощью внедрённого в информационную систему STS инструмента совместной обработки данных. Он позволяет работать с данными, полученными в различных диапазонах электромагнитного спектра и имеющих разное пространственное разрешение, проводить их совместный анализ. Для решения этой задачи очень важно иметь высокую точность географической привязки данных различных приборов, что с успехом осуществляется в STS.

Рассмотрим три примера комплексного использования спутниковых данных, полученных с небольшим временным интервалом, для определения скорости распространения вихревых структур, внутренних волн и фронта распреснённых вод.

Определение динамических и пространственных характеристик вихревой структуры. Вихри и вихревые структуры являются одними из наиболее важных гидрофизических процессов, отвечающих за эффективное перемешивание вод, особенно в прибрежной зоне. Они проявляются на спутниковых изображениях видимого и микроволнового диапазонов за счёт наличия пассивных трассеров или сдвигово-волнового механизма (Лаврова и др., 2011).

В юго-восточной части Балтийского моря вихревые структуры особенно ярко проявляются в летнее время в данных видимого диапазона, когда происходит интенсивное цветение цианобактерий.

В мае 2018 г. мористее мыса Таран (северо-западная оконечность Самбийского полуострова) наблюдалась сложная вихревая структура с ярко выраженной циклонической частью. Первый раз вихревое образование было отмечено на спутниковом изображении MSI Sentinel-2A от 6 мая (*puc. 8a*). В дальнейшем вихрь наблюдался на снимках MSI Sentinel-2A за 8 мая, MSI Sentinel-2A за 13 мая, MSI Sentinel-2A за 16 мая. На следующем доступном изображении от 24 мая по данным OLI Landsat-8 вихрь идентифицировался, однако крайне сложно определить, являлось ли данное проявление той же самой структурой или новым вихревым образованием.



*Рис. 8.* Вихревые структуры в юго-восточной части Балтийского моря: *а* — цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2A от 6 мая 2018 г.; *б* — сводная картина трансформации вихревой структуры по трём изображениям видимого диапазона (Lavrova et al., 2018)

В системе STS был проведён совместный анализ данных, на основании которого составлена схема с нанесёнными на неё контурами вихревого образования за 11 дней (*puc. 86*). Как показывает данная схема, вихрь оставался практически неподвижным в течение не менее 11 дней, лишь несущественно сдвигаясь в северном направлении. Средняя скорость распространения вихря, определённая по сдвигу центра вращения, составляла не более 0,6 см/с.

Подобный анализ был проведён для целого ряда случаев наблюдений вихревых структур в разные годы в этом районе. Многолетний мониторинг показал, что в юго-восточной части Балтийского моря они возникают постоянно и могут оставаться практически стационарными в течение длительного времени. На основе серии последовательных спутниковых изображений были определены скорость и время жизни вихревых структур, которые составили не более 0,6–1,9 см/с и 8–11 дней соответственно.

Проведённый в STS анализ многолетних рядов спутниковых данных, полученных в этом районе, в совокупности с информацией о поле ветра позволил определить метеоусловия, при которых образуются подобные квазистационарные вихревые структуры (Lavrova et al., 2018).

Определение скорости распространения иугов внутренних волн. Спутниковые данные давно и успешно используются для изучения внутренних волн в океане. С их помощью были получены районы регулярной генерации внутренних волн, определены основные пространственные характеристики. До недавнего времени определение параметров внутренних волн базировалось в основном на использовании РЛИ. В связи с появлением в свободном доступе данных видимого диапазона, имеющих высокое пространственное разрешение, существенно расширился массив спутниковой информации, на которой идентифицируются поверхностные проявления внутренних волн. Поскольку разница во времени между съёмками одного и того же района составляет, например, для Landsat-8 и Sentinel-2 от 8 до 18 мин, стало возможным не только получать пространственные характеристики внутренних волн, но и определять скорость их распространения. Решить такую задачу на основе одного изображения можно было только в единичных случаях, когда оно содержало несколько поверхностных проявлений одного и того же цуга внутренних волн, но при этом нужно было ещё доказать, что это проявление одного и того же процесса. Наличие же двух или нескольких последовательных изображений позволяет определить скорость распространения одиночных внутренних волн или их цугов с большой точностью.

В качестве примера приведём оценку скорости распространения передних фронтов двух пересекающихся цугов внутренних волн, выявленных на изображениях, полученных 13 июля 2017 г. над северо-восточной акваторией Чёрного моря с разницей в 17 мин. Съёмка одного и того же района была осуществлена приборами OLI/TIRS ИСЗ Landsat-8 в 08:19:41 UTC, а прибором MSI ИСЗ Sentinel-2A — в 08:36:34 UTC. С помощью инструментария STS для совместного анализа данных было получено, что для разных цугов скорости распространения передних фронтов составили от 0,35 до 0,42 м/с (Лаврова и др., 2018). На *рис. 9* (см. с. 280) представлен фрагмент изображения MSI Sentinel-2A с выделенными передними фронтами двух пересекающихся цугов внутренних волн. Красная линия соответствует положению передней волны в цуге в более ранний момент, синяя — положению той же волны через 17 мин.

Оценка скорости распространения границы речного плюма. Использование серии последовательных изображений, полученных с высоким пространственным и временным разрешением, позволяет также оценить скорость распространения фронта распреснённых вод, связанного с выносом рек. Как показывают спутниковые наблюдения (Lavrova et al., 2016; Nash, Moum, 2005), на границе речных плюмов выделяются гидрологические фронты, которые излучают внутренние волны в виде цугов короткопериодных волн, движущихся как к берегу, так и параллельно ему. Предполагается, что генерация внутренних волн происходит при определённой скорости распространения речного плюма, которая, в свою очередь, зависит от интенсивности речного стока. При проведении мониторинга плюма р. Кодор (восточная часть Чёрного моря) в отдельные дни удалось определить скорость распространения границы плюма по двум последовательным спутниковым изображениям MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 или ETM+ Landsat-7, полученным с разницей 12–18 мин.



*Рис. 9.* Сдвиг передних фронтов двух цугов внутренних волн за 17 мин. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 13 июля 2017 г., полученного над акваторией северо-восточной части Чёрного моря. Красным отмечено положение фронтов, определённое по изображению OLI Landsat-8, синим — положение тех же фронтов через 17 мин, определённое по изображению MSI Sentinel-2A

Так, например, использование данных MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 за 10 сентября 2017 г. позволило оценить скорость распространения как фронта распреснённых вод р. Кодор, так и переднего фронта цуга внутренних волн, образованного на границе этого фронта (*puc. 10*). Скорость распространения границы гидрологического фронта составляла всего 0,13 м/с. Обычно на фронтах речных вод образуются внутренние волны, когда скорость распространения фронта в два раза выше (Nash, Moum, 2005). Накопление статистики таких случаев поможет нам определить, как величина скорости распространения фронта распреснённых речных вод влияет на генерацию внутренних волн.



*Рис. 10.* Пример оценки скорости распространения гидрологического фронта р. Кодор и цуга внутренних волн по спутниковым данным за 10 сентября 2017 г. в системе STS

## Мониторинг ледяного покрова в Керченском проливе на базе многолетних рядов спутниковых данных

С использованием возможностей STS проведён ретроспективный анализ многолетних рядов данных, полученных от различных спутниковых систем, с целью оценки ледовой обстановки в Керченском проливе за период 1999—2017 гг. Особое внимание уделено анализу ледовой обстановки в январе — феврале 2017 г. и оценке влияния конструкций моста через Керченский пролив на распространение дрейфующего льда. Выявлены свидетельства того, что изменения ледового режима в Керченском проливе, происходящие в результате строительства моста, могут быть достаточно масштабными и существенными (Лаврова и др., 2017; Лупян и др., 2017; Lavrova et al., 2017).

В первую очередь использовались данные радиолокаторов с синтезированной апертурой, позволяющие получать информацию о подстилающей поверхности в любых погодных условиях, что особенно важно в зимний период, когда большую часть времени над акваторией пролива наблюдается сплошная облачность: ASAR Envisat (456 сцен с января 2003 г. по 8 апреля 2012 г.); SAR-C Sentinel-1A/B (с декабря 2014 г. и с декабря 2016 г. соответственно по февраль 2017 г. — в общей сложности 434 сцены). Использовались также спутниковые данные видимого и ИК-диапазонов: MODIS Terra/Aqua (с января 2000 г. по февраль 2017 г.); TM Landsat-5 (11 сцен с декабря 1999 г. по апрель 2011 г.); ETM+ Landsat-7 (349 сцен с декабря 1999 г. по февраль 2017 г.); OLI/TIRS Landsat-8 (105 сцен с декабря 2013 г. по февраль 2017 г.); MSI Sentinel-2A (30 сцен с декабря 2015 г. по февраль 2017 г.). Применение многоспектрального подхода позволяет не только надёжно выявлять области, покрытые льдом, определять тип льда, но и проводить оценки площадей ледяного покрова с высокой точностью.

Для анализа спутниковых данных использовались возможности и инструментарий информационного спутникового сервиса STS, а также архивные данные метеостанций Керчи и Тамани. Результаты анализа ледовой обстановки, полученные нами по спутниковым данным начиная с зимнего сезона 2007–2008 гг., сравнивались с архивной информацией, доступной на сайте ЕСИМО (http://193.7.160.230/web/esimo/azov/ice).

Полученные результаты можно кратко резюмировать следующим образом. 2000-е гг. характеризуются более частыми относительно периода второй половины прошлого века холодными зимами в Азовском море и, соответственно, в проливе. Адвекция льда в Керченский пролив из Азовского моря происходит регулярно. Подобные ситуации наблюдались в январе — феврале 2003, 2006, 2008, 2012 и 2014 гг. Становление льда в эти зимы происходило в основном в конце января — начале февраля. В 2002—2003 гг. Керченский пролив был покрыт льдом в течение практически четырёх месяцев с небольшими перерывами. В 2012 г. ледяной покров установился с 29 января и достиг максимальных размеров к середине февраля, при этом распространение границы сплочённого льда на юг было максимальным за все время наблюдений с 2000 г., а дрейфующие льдины выносились в Чёрное море. Ледяной покров в проливе в этот год отмечался на спутниковых снимках вплоть до 17 марта, что также является рекордом за время наблюдений с 2000 г. В 2014 г. ледяной покров, наблюдавшийся с 30 января по 3 февраля, был самым обширным по площади за период с 2000 по 2017 г.

Многолетний мониторинг свидетельствует о том, что до строительства Крымского моста в холодные зимы лёд свободно дрейфовал из Азовского моря на юг вдоль западного побережья пролива, а при сильных северных и северо-восточных ветрах даже выносился в Чёрное море. Для примера на *рис. 11a* (см. с. 282) приведена ситуация, наблюдавшаяся в данном районе 2–3 февраля 2014 г.

Ситуация, возникшая в результате адвекции льда из Азовского моря в Керченский пролив в период с 4 по 17 февраля 2017 г., разительно отличалась от наблюдавшихся ранее. На основе спутниковых данных, полученных в феврале 2017 г., было выявлено, что строительство Крымского моста оказало существенное влияние на динамику ледяного покрова и режим распространения льда в проливе. Ежедневный спутниковый мониторинг Керченского пролива в период с 4 по 17 февраля 2017 г. позволил выявить особенности образования и дрейфа ледяного покрова Азовского моря через пролив, а также его взаимодействие с опорами основного и технологического мостов, которые сыграли роль плотины, остановившей лёд, распространяющийся в сторону Чёрного моря. Было обнаружено, что лёд даже при сильном северо-восточном ветре практически не проходил между опорами технологического и основного мостов, включая самый широкий судоходный проход. Это хорошо видно на *рис. 116*, где приведены данные, полученные с помощью многоканального сенсора оптического диапазона ETM+ ИСЗ Landsat-7 11 февраля 2017 г.





В настоящий момент достаточно сложно оценить, какой вклад в изменение ледовой обстановки в Керченском проливе вносит уже построенный Крымский мост, поскольку в зимние периоды 2017–2018 и 2018–2019 гг. ледяной покров в проливе отсутствовал. Однако результаты, ранее полученные нами, свидетельствует о необходимости проведения непрерывного спутникового мониторинга этого района, возможности которого сегодня обеспечивают современные системы и технологии, в частности информационная система STS.

## Перспективы развития

Дальнейшее развитие STS связано с увеличением количества видов данных, интегрированных в систему, и разработкой новых инструментов анализа. В частности, планируется внедрение средств работы с данными подспутниковых измерений для обеспечения их совместного анализа со спутниковой информацией.

Планируется расширение возможностей работы с данными буёв Argo. Будут организованы как оперативный сбор данных о состоянии, так и накопление в виде многомерного массива истории измерений в разных частях акваторий на поверхности и на глубине для последующей визуализации в виде карт и графиков.

Ожидается появление новых возможностей изучения явлений на морской поверхности благодаря интеграции в STS данных спутниковой альтиметрии и инструментов для работы с этими данными. Предполагается внедрение в STS численных моделей, позволяющих определять количественные характеристики состояния морской поверхности на основе спутниковой информации.

Открытие ESA доступа к архивам РЛИ спутников ERS и Envisat за все годы их работы создаёт возможность значительного увеличения временных рядов наблюдений. Это позволит проводить исследования многолетней динамики водных объектов.

Планируется разработка нового инструментария для накопления и анализа статистических данных в привязке к регулярной сетке. Это позволит использовать имеющуюся базу данных обнаруженных явлений для оценки частоты возникновения явлений различных типов в заданных точках морской поверхности. В дальнейшем такого рода данные лягут в основу вероятностных оценок и дадут возможность построения тематических карт.

### Заключение

В современных условиях работа с многолетними архивами спутниковых данных, изучение пространственно-временной изменчивости, выявление трендов и построение прогнозов и т.п. невозможно без использования специализированных информационных систем, таких как STS. Оперативная оценка состояния морской среды, а именно определение параметров течений, выносов рек, нефтяных загрязнений, ледовой обстановки и многое другое, требует проведения комплексного анализа всех доступных спутниковых данных совместно с гидрометеорологической информацией. Использование такой системы необходимо для оперативной работы с изображениями большого размера (несколько гигабайт) и совместного анализа разнородных данных. Опыт работы с информационной системой See the Sea подтверждает, что она является инструментом, позволяющим эффективно решать различные задачи исследования Мирового океана.

Развитие информационной системы STS осуществляется в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2019).

### Литература

- 1. Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В., Осадчиев А. А., Хлебопашев П. В., Пелевин В. В., Грабовский А. Б., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Соловьев Д. М., Полухин А. А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
- 2. Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
- 3. 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.
- 4. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
- 5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 148–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166.
- 6. Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Назирова К. Р., Строчков А. Я. Возможность получения динамических и пространственных характеристик процессов и явлений в прибрежной зоне на основе комплексного использования квазисинхронных спутниковых данных // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 108–124. DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-108-124.
- 7. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- 8. Лупян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–262.
- 9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных

ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С 263–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.

- 10. *Лупян Е.А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Ледовая обстановка в районе строительства Крымского моста в феврале 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 247–251. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
- 11. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.
- 12. Митягина М.И. Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Чёрного моря по данным многолетних спутниковых наблюдений // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 125–136. DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-125-136.
- 13. *Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю.* Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
- 14. *Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Жук Е. В., Алферьева Я. О.* Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
- 15. *Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
- 16. Уваров И.А., Халикова О.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Платонов А.Е., Прошин А.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
- 17. *Щеголихина М. С., Лаврова О. Ю.* Мониторинг выносов речных и лагунных вод в Азовское и Балтийское моря на основе спутниковых данных видимого диапазона // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер. «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 180–191. DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-180-191.
- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu. Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 9638. 2015. 96380D. DOI: 10.1117/12.2193905.
- 19. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov M. A., Bocharova T. Yu., Kashnitsky A. V. River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 9999. 2016. 99990G. DOI: 10.1117/12.2241312.
- 20. *Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Kostianoy A. G.* Long-term monitoring of sea ice conditions in the Kerch Strait by remote sensing data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 10422. 2017. 104220L. DOI: 10.1117/12.2277829.
- 21. *Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya.* Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 10784. 2018. 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
- Loupian E., Lavrova O., Kashnitsky A., Uvarov I. "See the Sea" new opportunities for distributed collaboration aimed at solution of oceanographic problems using remote sensing // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2018. V. 59. Supl. 1. P. 91–93.
- Mityagina M. I., Lavrova O. Yu. Satellite survey in the Black Sea coastal zone // Intern. Water Technology J. 2012. V. 2. No. 1. P. 67–79.
- 24. *Mityagina M., Lavrova O.* Satellite survey of inner seas: oil pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 10. P. 875–899. DOI: 10.3390/rs8100875.
- 25. *Mityagina M. I., Lavrova O. Yu.* Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 10422. 2017. 1042215. URL: https://doi.org/10.1117/12.2278025.
- 26. *Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Uvarov I.A.* "See the Sea": Multi-user information system for investigating processes and phenomena in coastal zones via satellite remotely sensed data, particularly hyperspectral data

// Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 9240. 2014. 92401C. DOI: 10.1117/12.2067300.

- 27. *Nash J. D., Moum J. N.* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. V. 437. P. 400–403.
- 28. *Neteler M., Bowman M. H., Landa M., Metz M.* GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS // Environmental Modelling and Software. 2012. V. 31. P. 124–130.

## Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface

### O. Yu. Lavrova, M. I. Mityagina, I. A. Uvarov, E. A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: olavrova@iki.rssi.ru, smis@smis.iki.rssi.ru

The information system See the Sea (STS, http://ocean.geosmis.ru) was developed at the Space Research Institute RAS to provide oceanographers with tools of distributed processing of satellite, meteorological and other data accumulated in the data archives of IKI-Monitoring Center for Collective Use (http://ckp.geosmis.ru/). The system provides not only access to long-term data archives, but also to on-line data analysis tools. A specialized subsystem of description of the discovered phenomena is intended for accumulation and systematization of the knowledge gained as the working result of a re-search team. The taxonomic classifier has been created to describe the phenomena that can be detected on the sea surface. This paper describes the current capabilities of STS and its use experience in the study and monitoring of phenomena and processes on the sea surface. The article also discusses the prospects for the development of the system, primarily expanding the variety of the data included (for example, Argo buoy measurements and satellite altimetry data) and development of new tools for data analysis and processing.

**Keywords:** information system, IKI-Monitoring CCU, satellite data, world ocean, radar imagery, oil pollution of the sea surface, hydrophysical processes, vortices, internal waves, river plumes

Accepted: 26.06.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287

### References

- Zavialov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V., Osadchiev A. A., Khlebopashev P. V., Pelevin V. V., Grabovskiy A. B., Izhitskiy A. S., Goncharenko I. V., Soloviev D. M., Polukhin A. A., Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea, *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 265–280, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite monitoring of oil slicks on the Black Sea surface, *Izvestiya*, *Atmospheric and Ocean Physics*, 2013, Vol. 49, Issue 9, pp. 897–912, URL: https://doi.org/10.1134/ S0001433813090107.
- Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
- 4. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p.
- 5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ledovaya obstanovka v Kerchenskom prolive v tekushchem stoletii. Retrospektivnyi analiz na osnove sputnikovykh dannykh (Ice conditions in the Kerch Strait in the current century. Retrospective analysis based on satellite data), *Sovremennye*

problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 148–166, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166.

- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya., Vozmozhnosť polucheniya dinamicheskikh i prostranstvennykh kharakteristik protsessov i yavlenii v pribrezhnoi zone na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya kvazisinkhronnykh sputnikovykh dannykh (The possibility of receiving dynamic and spatial characteristics of processes and phenomena in a coastal zone based on integrated use of quasi-synchronous satellite data), *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Geografiya i Geoekologiya*", 2018, No. 3, pp. 108–124, DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-108-124.
- 7. Lisitzin A. P., Marginal'nyi fil'tr okeanov (Marginal filter of the oceans), *Okeanologiya*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–747.
- 8. Loupian E.A., Matveev A.A., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sputnikovyi servis See the Sea instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (Satellite service See the Sea a tool for investigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
- Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
- Loupian E. A., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ledovaya obstanovka v rayone stroitel'stva Krymskogo mosta v fevrale 2017 g. (Ice conditions in the construction area of the Crimean Bridge in February 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 247–251, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-247-251.
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP IKI-Monitoring) (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170.
- Mityagina M. I., Rasprostranenie plenok estestvennykh nefteproyavlenii na morskoi poverkhnosti yugovostochnoi chasti Chernogo morya po dannym mnogoletnikh sputnikovykh nablyudenii (Distribution of natural oil films on the surface of the south-eastern part of the Black Sea revealed by the multi-year satellite observations), *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta*, *Seriya "Geografiya i Geoekologiya*", 2018, No. 3, pp. 125–136, DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-125-136.
- 13. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Sputnikovyi monitoring neftyanykh zagryaznenii morskoi poverkhnosti (Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 130–149.
- Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., Zhuk E. V., Alferyeva Ya. O., Osobennosti vyyavleniya parametrov rechnogo plyuma kontaktnymi i distantsionnymi metodami (Features of river plume parameter determination by in situ and remote sensing methods), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 227–243, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
- Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V., Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (The GEOSMIS System: Developing Interfaces to Operate Data in Modern Remote Monitoring Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108.
- 16. Uvarov I.A., Khalikova O.A., Balashov I.V., Burtsev M.A., Loupian E.A., Matveev A. M., Platonov A. E., Proshin A.A., Tolpin V.A., Krasheninnikova Yu.S., Organizatsiya raboty s meteorologicheskoi informatsiei v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa (Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45.
- 17. Shchegolikhina M.S., Lavrova O.Yu., Monitoring vynosov rechnykh i lagunnykh vod v Azovskoe i Baltiiskoe morya na osnove sputnikovykh dannykh vidimogo diapazona (Monitoring of river and lagoon water discharges in Azov and Baltic Seas on the basis of the satellite data of visible range), *Vestnik Tverskogo*

gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Geografiya i Geoekologiya", 2018, No. 3, pp. 180–191, DOI: 10.26456/2226-7719-2018-3-180-191.

- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu., Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, Proc. SPIE 9638, 2015, 96380D, DOI: 10.1117/12.2193905.
- 19. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov M. A., Bocharova T. Yu., Kashnitsky A. V., River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, Proc. SPIE 9999, 2016, 99990G, DOI: 10.1117/12.2241312.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Kostianoy A. G., Long-term monitoring of sea ice conditions in the Kerch Strait by remote sensing data, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, Proc. SPIE 10422, 2017, 104220L, DOI: 10.1117/12.2277829.
- 21. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE 10784*, 2018, 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.
- 22. Loupian E., Lavrova O., Kashnitsky A., Uvarov I., "See the Sea" new opportunities for distributed collaboration aimed at solution of oceanographic problems using remote sensing, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2018, Vol. 59, Supl. 1, pp. 91–93.
- 23. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Satellite survey in the Black Sea coastal zone, *Intern. Water Technology J.*, 2012, Vol. 2, No. 1, pp. 67–79.
- 24. Mityagina M., Lavrova O., Satellite survey of inner seas: oil pollution in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 10, pp. 875–899, DOI: 10.3390/rs8100875.
- 25. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE 10422*, 2017, 1042215, available at: https://doi.org/10.1117/12.2278025.
- Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Uvarov I. A., "See the Sea": Multi-user information system for investigating processes and phenomena in coastal zones via satellite remotely sensed data, particularly hyperspectral data, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE 9240*, 2014, 92401C, DOI: 10.1117/12.2067300.
- 27. Nash J. D., Moum J. N., River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature*, 2005, 437, pp. 400–403.
- 28. Neteler M., Bowman M. H., Landa M., Metz M., GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS, *Environmental Modelling and Software*, 2012, Vol. 31, pp. 124–130.