

Веб-сервис для комплексного анализа данных лагранжевых дрейфтеров и спутникового зондирования для исследования вихревых процессов в морях

Д. А. Елизаров, Е. В. Краюшкин, О. Ю. Лаврова, А. Я. Строчков

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: dimaelik71@gmail.com

Представлены результаты разработки веб-сервиса для хранения и обработки натуральных измерений и интеграции данных лагранжевых дрейфтеров в систему спутникового мониторинга See the Sea (STS). Данные для веб-сервиса собирались в научных морских экспедициях за 2016–2022 гг., выполненных Институтом космических исследований РАН с целью изучения гидрофизических характеристик прибрежных морских вод контактными и дистанционными методами. Веб-сервис используется для стандартизации и хранения данных. Он также обеспечивает последующий экспорт результатов контактных измерений в информационную систему STS. Для предобработки измерений с лагранжевых дрейфтеров на языке Python разработана программа, позволяющая вычислять дополнительные параметры, такие как скорость дрейфтера и расстояние, которое он прошёл. Она также служит «прослойкой» между архивными данными и веб-сервисом. Показан функционал веб-сервиса, позволяющий визуализировать измерения по координатам на встроенной карте посредством интеграции с сервисом Mapbox. Представлены результаты интеграции с системой STS, куда обработчик был встроен в виде отдельного программного модуля, что позволило визуализировать данные напрямую в интерфейсе STS, таким образом проводя совместный анализ данных натуральных измерений со спутниковыми изображениями и другими тематическими данными. Результаты совместного анализа в среде STS были использованы для исследования вихревых диполей в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря у побережья Калининградской обл. с целью определения трёхмерной структуры течений в вихревых диполях.

Ключевые слова: спутниковая информационная система See the Sea, подспутниковые измерения *in situ*, лагранжевые дрейфтеры, веб-сервис, обработка и хранение данных, визуализация данных, Python, вихревые процессы

Одобрена к печати: 08.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-300-312

Введение

Циркуляция прибрежных вод, и в частности субмезомасштабные вихревые образования, играют важную роль в переносе поверхностно-активных веществ по акватории моря, их аккумуляции и перераспределении в пространстве, что, в свою очередь, определяет экологическое состояние морских акваторий.

Субмезомасштабные вихревые процессы, радиус которых меньше бароклинного радиуса деформации Россби, в прибрежной зоне обладают широким масштабом пространственной и временной изменчивости, что существенно осложняет задачу их исследования и прогнозирования как во времени, так и пространстве. Задачу определения параметров (скорость течений внутри вихревых структур, глубина распространения, общая скорость и направление распространения в пространстве), а также задачу выделения наиболее активных областей вихреобразования необходимо решать с использованием комплексного подхода, заключающегося в совместном использовании данных дистанционного зондирования Земли из космоса и данных океанографических измерений.

Для определения количественных характеристик субмезомасштабных вихревых образований, как правило, необходимо проводить экспериментальные океанографические измерения основных свойств вод, вовлечённых в вихревое движение. Важнейшими параметрами, определяющими характер того или иного вихревого процесса, являются скорость и направление течений внутри вихря, а также глубина его проникновения в толщу вод. Для определения

параметров динамики вод используются два подхода: подход Эйлера, когда измерение параметров движения вод происходит в каждой отдельной точке пространства с использованием измерителя течений (Краюшкин и др., 2022), и подход Лагранжа, когда измерение параметров движения вод происходит путём внедрения в поток пассивной частицы, движение которой во времени совпадает с движением самого потока (Лаврова и др., 2019а). В настоящей работе показаны экспериментальные измерения параметров вихревых процессов с использованием подхода Лагранжа на основе запуска в акваторию моря пассивных дрейфующих лагранжевых GPS/GSM-дрейфтеров (GPS — *англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования; GSM — *англ.* Global System for Mobile Communications) конструкции, аналогичной ранее описанной (Лаврова и др., 2019а).

Применение лагранжевых дрейфтеров в изучении вихревых процессов в прибрежной зоне моря позволяет получать последовательное местоположение лагранжевой частицы в пространстве на протяжении относительно длительных промежутков времени с последующим определением скорости и направления движения данной частицы, повторяющей характер циркуляции вод в исследуемом районе. Совместный же анализ результатов экспериментов с лагранжевыми дрейфтерами в совокупности с данными квазисинхронных спутниковых наблюдений даёт возможность не только проводить количественные расчёты характеристик динамики вод, но также выполнять качественный анализ причин возникновения наблюдаемого характера циркуляции. Кроме того, для обеспечения достоверности спутниковых данных требуется их валидация, которая в первую очередь осуществляется на основе измерений *in situ* (Arabi et al., 2020; Le Hénaff et al., 2020; Marmorino et al., 2010). Для полноты исследования вихревых процессов на основе лагранжевых дрейфтеров необходим комплексный анализ данных, полученных как во время синхронных подспутниковых экспериментов (или измерений), так и при спутниковом зондировании морской поверхности.

Совместный анализ данных, полученных из спутниковых и подспутниковых измерений, представляет собой сложную задачу, для решения которой необходима географическая привязка, предварительная обработка и структуризация данных, автоматизация процесса импорта и экспорта измерений, визуализация данных. Для решения этих и других задач был разработан веб-сервис и специальные «инструменты». В данной статье рассматриваются результаты интеграции данных лагранжевых мини-дрейфтеров из веб-сервиса в систему спутникового мониторинга See the Sea (STS) для реализации синхронных подспутниковых измерений.

Информационная система See the Sea

Продукт See the Sea (STS) представляет собой информационную систему, ориентированную на междисциплинарные исследования Мирового океана с использованием данных спутникового наблюдения. Она является неотъемлемой частью Центра коллективного пользования (ЦКП) Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по мониторингу (Лаврова и др., 2019б; Лупян и др., 2019). Основной компонент системы — веб-сервер, предоставляющий пользователям доступ к спутниковым данным и их обработке, а также к инструментам анализа данных. В рамках веб-сервера, основанного на технологии GEOSMIS (Толпин и др., 2011), реализован картографический интерфейс для работы с пространственной информацией, предоставляющий возможности визуализации данных и управления процедурами анализа и обработки с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг». В составе системы предусмотрены различные векторные слои географической основы, такие как береговая линия, карты глубин, гидрография суши и др.

Система STS обеспечивает доступ ко всем спутниковым данным и результатам их обработки, содержащимся в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг», представленным на официальном веб-сайте (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>). Система поддерживает работу со спутниковыми данными, охватывающими сверхвысокочастотный (СВЧ), видимый и инфракрасный диапазоны электромагнитного спектра. В состав системы входит также сервер баз данных, предназначенный для хранения различной специализированной информации.

Система STS включает различные сервисы, ориентированные на возможность выделения и описания различных процессов и явлений в океане и атмосфере над ним (вихревые процессы, поверхностные проявления внутренних волн, течения, поверхностные загрязнения, процессы, связанные с взаимодействием океана и атмосферы, и др.), а также на ведение долгосрочных баз данных таких описаний (Толпин и др., 2011).

Большое преимущество STS заключается в формировании баз данных разнообразных явлений и процессов в океане и атмосфере, выявленных на основе данных спутникового зондирования Земли. Базы данных регулярно пополняются и аннотируются экспертами с последующей многократной проверкой. На данный момент в системе созданы 37 баз данных различных явлений и процессов.

Данные и устройство мини-дрейфтера

Принцип работы дрейфтеров любого типа основан на периодическом определении координат своего местонахождения и передаче их в режиме реального времени исследователям, выполняющим подспутниковый эксперимент. Для этого дрейфтер должен быть оснащён приёмником спутниковых сигналов GPS. Полученные с помощью этого приёмника координаты следует передать исследователям, для чего используются различные виды радиосвязи. Дрейфтеры, запущенные в открытом море или океане, передают данные по спутниковой связи. Спутниковые каналы, несмотря на появление новых технологий, всё ещё остаются достаточно дорогими. В данной статье рассматриваются дрейфтеры, запускаемые в прибрежной зоне морей на небольшом расстоянии от берега, в зоне действия наземной мобильной связи GSM. Обычно при благоприятных условиях дальность мобильной связи от берега составляет 20–25 км, что в исследованиях динамики морских вод в шельфовой зоне, многие годы выполняемых группой сотрудников ИКИ РАН, оказывается достаточным. Такой подход позволяет значительно уменьшить затраты на проводимые подспутниковые эксперименты. Мы будем использовать для дрейфтеров такого типа название «мини-дрейфтеры», отражающее специфику их применимости и невысокую стоимость. Мини-дрейфтер имеет конструкцию

(рис. 1), описанную в стандарте барометрического дрейфтера (http://www.jcommops.org/doc/DBCP/svpb_design_manual.pdf), с незначительными упрощениями: вместо цилиндрического подводного паруса используется крестообразный, имеющий под разными углами поворота неодинаковую площадь сечения (различия не превышают 15%). Такое отличие не влияет на направление перемещения дрейфтера и незначительно изменяет его скорость.

Трекер GPS/GSM, помещённый в водонепроницаемый пластиковый бокс, работает в диапазоне 1200–1500 МГц для принимаемых сигналов GPS и 800–1000 МГц для мобильной связи GSM/3G. Бокс с трекером крепится на поплавке, от которого опущен трос с подводным парусом и грузом на глубину, где требуется определить направление течения.

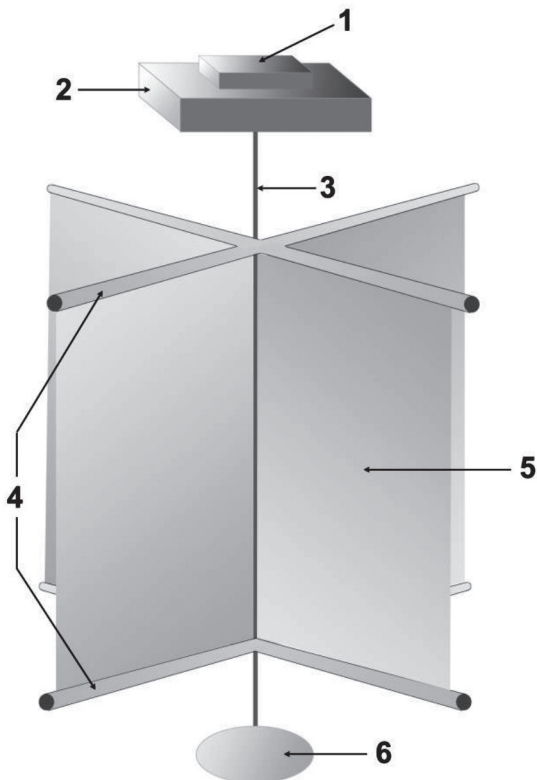


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции мини-дрейфтера: 1 — водонепроницаемый бокс с трекером; 2 — поплавок; 3 — трос; 4 — каркас паруса; 5 — парус; 6 — груз (Лаврова и др., 2019а)

Для функции приёма и передачи данных в мини-дрейфтерах используются автомобильные трекеры различных конструкций. В нашей работе использовались модели Coban TK 103-2 и Proma Sat 1000. Первый из них отправляет координаты своего местонахождения с помощью SMS (*англ.* Short Message Service, короткие текстовые сообщения) на заданный при настройке номер мобильного телефона, из которого затем данные выгружаются на компьютер для дальнейшей обработки. Вторая модель трекера пересылает координаты в формате GPRS (*англ.* General Packet Radio Service, пакетная передача данных) на сайт геопозиционирования, на котором сразу можно визуализировать его трек на цифровой карте и затем выгрузить в виде файла координат на компьютер. Каждый из этих подходов имеет свои достоинства и недостатки: получение координат в виде SMS обеспечивает их сохранность в мобильном телефоне неограниченное время, однако для оперативной визуализации трека приходится всё время подключать телефон к компьютеру для скачивания вновь поступивших точек трека; передача координат на сайт геопозиционирования позволяет непрерывно наблюдать изменения трека, но сохранность всего массива данных гарантируется владельцами сайта ограниченное время, и если своевременно не скачать данные с сайта, можно их потерять.

Программирование трекеров перед запуском осуществляется отправкой последовательности SMS с командами, задающими настройки режима работы. Данные, полученные от дрейфтера либо по SMS, либо с сайта геопозиционирования, не совпадают с форматом импорта в систему See the Sea и требуют преобразования к нужному виду. В случае данных, принятых по SMS, в файле следует удалять служебные команды настройки дрейфтера перед запуском или при сбросе настроек во время дрейфа. Например, если настройка часового пояса вернётся к значению по умолчанию, время данных на треке окажется неверным и его придется корректировать. Кроме того, в посылках SMS содержится излишняя служебная информация о параметрах работы трекера, которую следует удалять. У данных, скачанных с сайта геопозиционирования, имеется огромная избыточность точек координат, поскольку по умолчанию принимается до десяти отсчётов в минуту. Такая частота, применяемая на сайте геопозиционирования, оправдана для движущегося наземного транспорта, но совершенно не требуется для детального представления трека дрейфтера, поскольку скорость движения дрейфтера в морских течениях гораздо ниже, даже скорость потока 1 м/с встречается крайне редко. В результате количество точек трека приходится уменьшать на два порядка, чтобы оставить разумные интервалы между последовательными точками трека. Все эти процедуры выполняются ещё до загрузки данных в систему See the Sea.

Методика обработки данных, полученных с мини-дрейфтеров

Прежде чем с данными дрейфтеров можно будет осуществлять различные операции в сервисе, они проходят два этапа: предобработку и постобработку. Цель этих этапов — привести данные к определённому формату, сгруппировать их, исключить заведомо неверные данные, а также вычислить скорость и направление движения дрейфтера, изначально не фиксирующиеся самим прибором.

Под предобработкой подразумевается этап, когда натурные измерения загружаются в специально разработанный нами веб-сервис (см. ниже). На этом этапе данные приводятся к общему формату, а также рассчитывается дистанция пройденного пути и скорость, исходя из координат, даты и времени измерения. Для этого используется программный модуль, написанный на языке Python и интегрированный в веб-сервис (<https://gitlab.com/insap/handlers/importer-python-drifters>).

После импорта данные хранятся в базе данных и доступны для чтения, модификации, удаления и повторной загрузки через веб-интерфейс. На этапе постобработки пользователю доступен отдельный интерфейс, где он может выбрать фильтры для измерений, а также просмотреть данные на встроенной карте.

Пользователь может фильтровать данные по номеру дрейфтера, что позволяет работать с данными как конкретного дрейфтера, так и всех дрейфтеров одновременно.

Для лучшего восприятия натуральных измерений пользователь может настроить общее количество отображаемых данных на карте, например отображая не каждое измерение, а лишь половину.

Веб-сервис для хранения и обработки данных мини-дрейфтеров

Предоставление пользователям удобного графического интерфейса для обработки данных, полученных в ходе морских и наземных научных экспедиций, реализуется веб-сервисом. Основным источником указанных данных служат научные приборы, применяемые для выполнения измерений, необходимых для достижения поставленных исследовательских целей. У проекта открытый исходный код, а также он может обрабатывать данные и других приборов (Елизаров и др., 2023).

Общая схема работы веб-сервиса представлена на *рис. 2*.

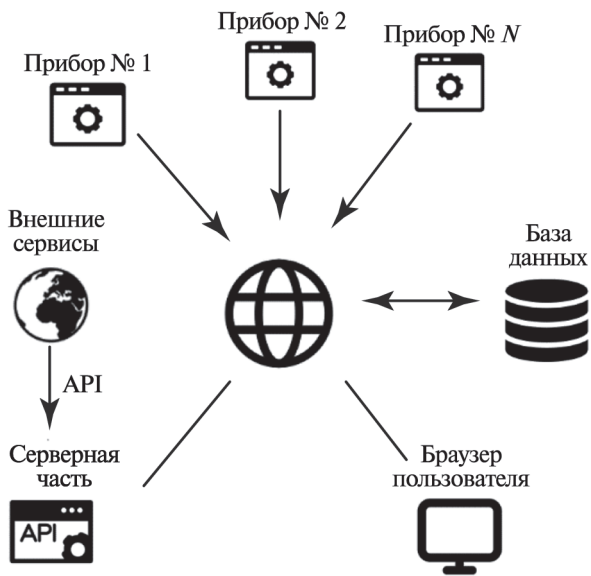


Рис. 2. Общая схема функционирования разработанного веб-сервиса, каждый прибор представляет собой модуль, состоящий из скрипта для преобработки данных и скрипта для постобработки данных

Веб-сервис, предназначенный для хранения и обработки данных подспутниковых измерений, включает в себя следующие интерфейсы для взаимодействия с пользователями:

- интерфейс для создания и редактирования метаданных экспедиций;
- интерфейс, обеспечивающий возможность экспорта и импорта экспедиционных данных;
- интерфейс визуализации данных, предоставляющий средства для наглядного представления информации;
- интерфейс хранения файлов, предназначенный для работы с локальными архивами экспедиций, т. е. журналами экспедиций и т. д.

Функциональные возможности системы позволяют осуществлять создание экспедиций, а также импортировать в них информацию о наземных измерениях, полученных различными приборами за определённый временной период. Экспедиции разделены по датам, что обеспечивает возможность экспорта и импорта измерений как в веб-сервис, так и в другие системы с помощью API (*англ.* Application Programming Interface) (*рис. 3*, см. с. 305).

Функционал системы содержит встроенные средства для работы с данными, которые имеют привязку к координатам. Одно из таких средств — это визуализация измерений на встроенной в веб-сервис карте, работающей посредством интеграции с модулем MapBox (<https://www.mapbox.com>). Результат такой визуализации обеспечивает быстрый просмотр данных для оценки корректности внесённых измерений в веб-сервис (*рис. 4* (см. с. 305), *5* (см. с. 306)).

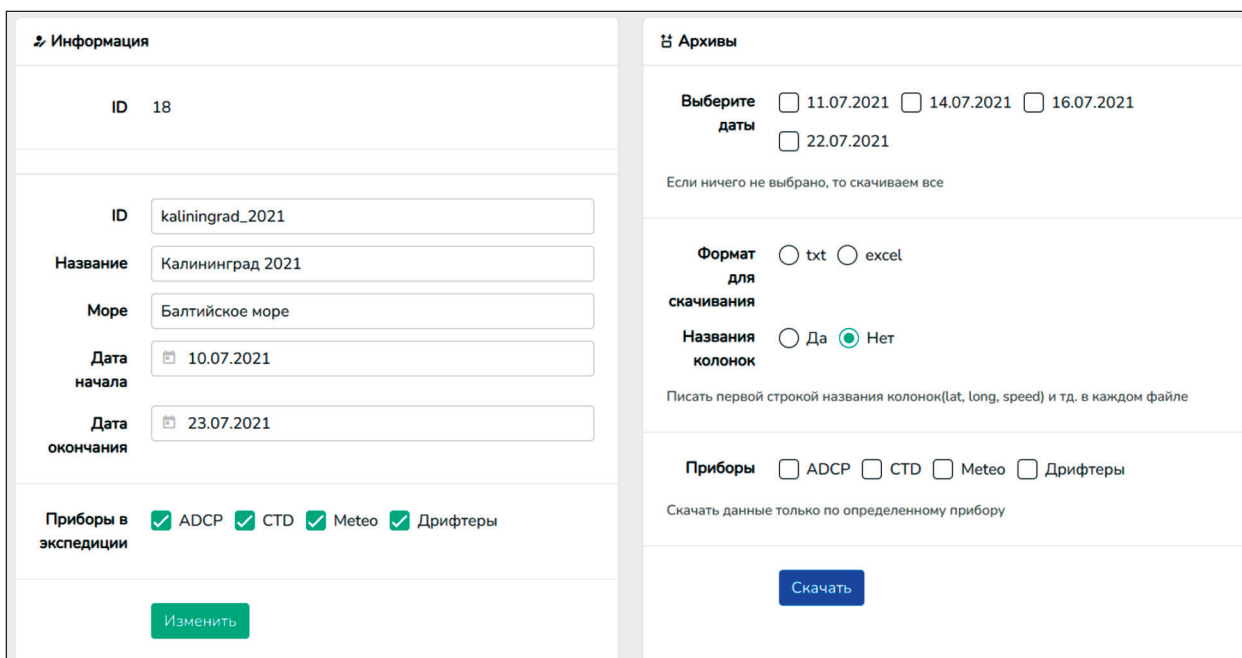


Рис. 3. Пользовательский интерфейс просмотра и редактирования сведений об экспедиции с возможностью экспорта хранимых в базе данных измерений

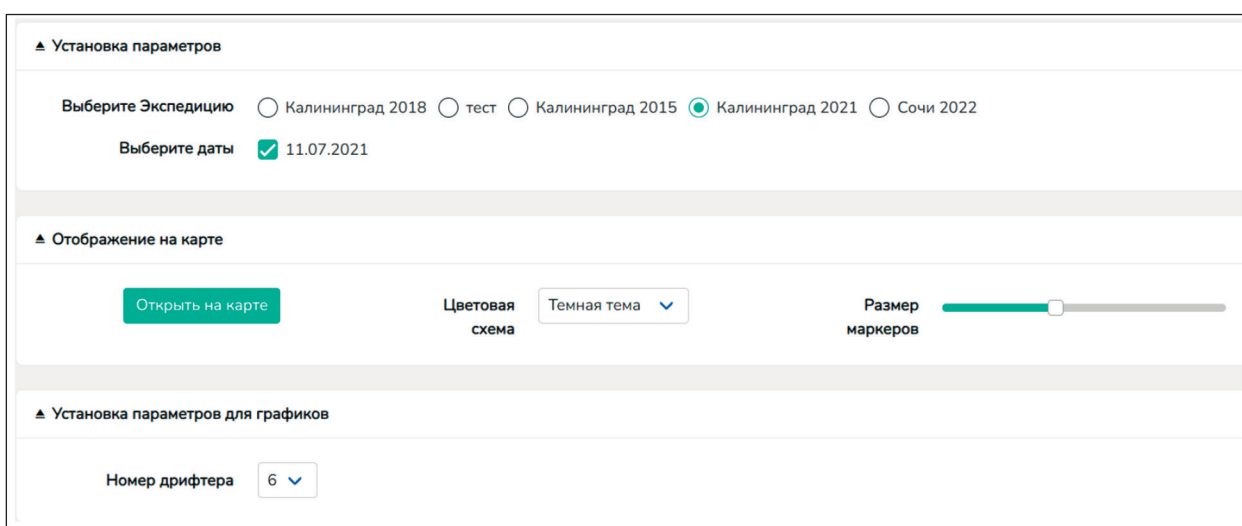


Рис. 4. Пользовательский интерфейс для настройки визуализации данных дрейфтеров на встроенной карте

Интеграция данных мини-дрейфтеров в информационную систему See the Sea

Данные с дрейфтеров из веб-сервиса были успешно интегрированы в информационную систему спутникового мониторинга STS. В результате данной интеграции натурные измерения, прошедшие первичную обработку и загруженные в веб-сервис, становятся доступными для использования в рамках системы STS. В рамках интеграции в систему спутникового мониторинга был добавлен отдельный интерфейс с натурными измерениями с возможностью получения данных из веб-сервиса и вывода их на интерфейс STS, а также с последующим наложением спутниковых изображений для проведения комплексного мониторинга морских течений.



Рис. 5. Пример быстрого превью данных с помощью интерфейса модуля MapBox

Иллюстрация взаимодействия между системой спутникового мониторинга STS и веб-сервисом представлена на рис. 6. В процессе интеграции на стороне системы спутникового мониторинга был разработан специализированный модуль для визуализации данных, получаемых с дрейфтеров. Этот модуль осуществляет приём данных посредством API веб-сервиса и визуализирует их с использованием функционала STS, представляя информацию в форме отдельного слоя. Этот механизм позволяет наложить данные натуральных измерений на другие слои, включая различные спутниковые изображения.

В ходе интеграции блока обработки данных натуральных измерений была реализована функциональность визуализации информации, полученной от дрейфтеров, непосредственно в картографическом интерфейсе системы STS. Пользователь может выбрать конкретную экспедицию из веб-сервиса, определить интересующий прибор и дату проведения измерений. Интеграция с системой спутникового мониторинга позволяет пользователям применять для проведения исследований в STS уже отлаженную и постоянно развивающуюся многофункциональную систему сбора и ведения архивов спутниковых данных, функционирующую в ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Таким образом, совместное использование архивов спутниковых и подспутниковых данных предоставляет возможность проведения совместного анализа данных натуральных измерений в сочетании со спутниковыми изображениями и другими тематическими данными, представленными в системе.

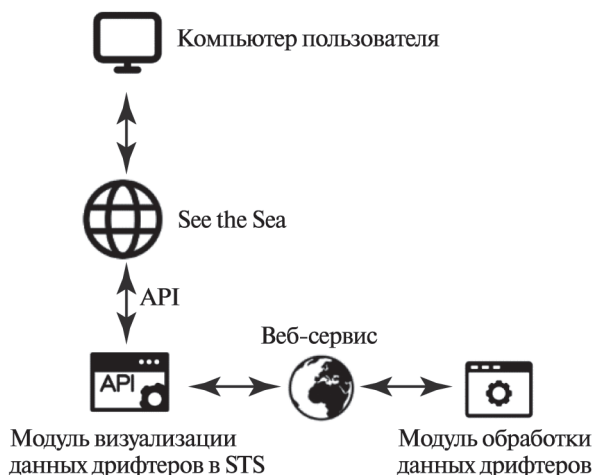


Рис. 6. Схема интеграции и взаимодействия веб-сервиса и See the Sea. Для работы с данными дрейфтеров на стороне STS написан пользовательский интерфейс, который включён в модуль визуализации

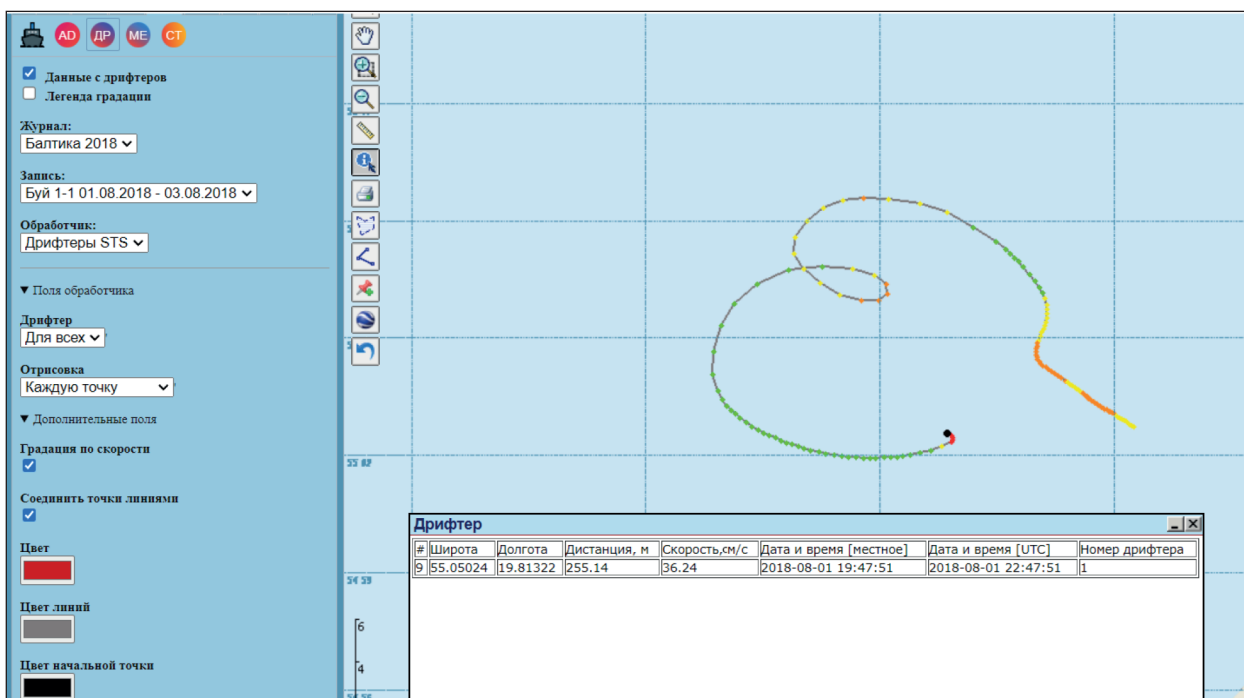


Рис. 7. Визуализация данных с дрейфтера, полученных 1–3 августа 2018 г., в системе STS через API веб-сервиса с градацией по скорости. Чёрная точка — это начальная точка измерения, все последующие соединены между собой линиями в порядке поступления данных с дрейфтера

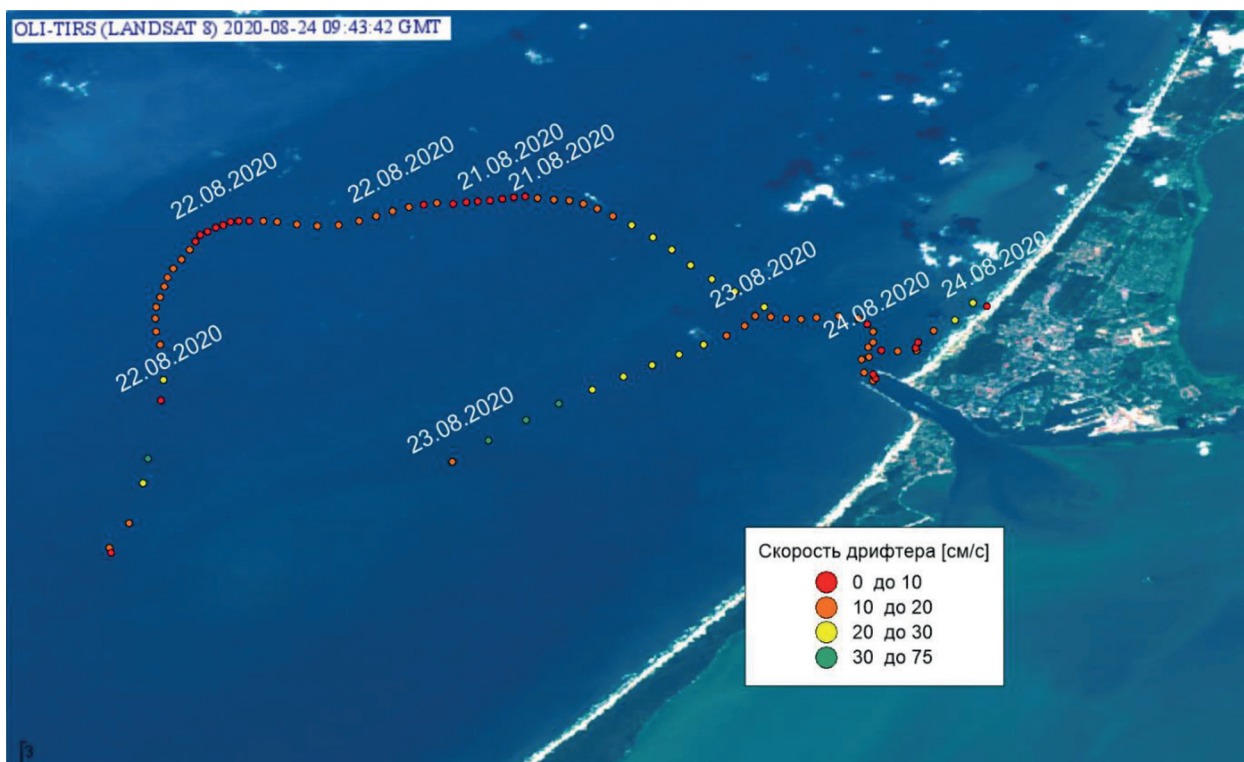


Рис. 8. Совместная визуализация данных с дрейфтера и спутникового изображения OLI Landsat-8 от 24 августа 2020 г.

Например, на рис. 7 показана визуализация данных дрейфтера за 1–3 августа 2018 г. Каждая точка отмечена своим цветом в зависимости от скорости дрейфтера, градация показана на рис. 8. Все точки, начиная с первой, которая выделена чёрным цветом, соединены между собой

собой линиями для более наглядной визуализации направления движения дрейфтера. Кроме того, можно выбирать свой цвет для измерений (если не включена градация), соединяющих линий и первого измерения. В интерфейсе присутствует возможность отображения как всех измерений, так и их части на случай, если количество измерений у дрейфтера достаточно большое, что позволяет в удобном формате видеть картину в целом. С помощью инструментария STS можно просмотреть точные значения измерений, в том числе скорость и пройденную дистанцию, кликнув возле ближайшей точки на карте.

Предлагаемый функционал был использован для исследования вихревых диполей в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря у побережья Калининградской обл. На спутниковом изображении видимого диапазона, полученного 14.07.2021 с сенсора MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2B, были выявлены вихревые диполи, параметры которых удалось определить во время синхронных подспутниковых измерений. Полученные данные впоследствии были внесены в веб-сервис, а работа с ними продолжалась в STS, где проводился совместный анализ данных натуральных измерений и спутниковой информации.

В результате совместного анализа спутниковой информации и данных океанографического эксперимента была описана структура течений в вихревых диполях, возникающих в прибрежной зоне Калининградской обл. На *рис. 9* представлена карта-схема проведённого эксперимента по запуску лагранжевого дрейфтера в районе обнаружения вихревого диполя.

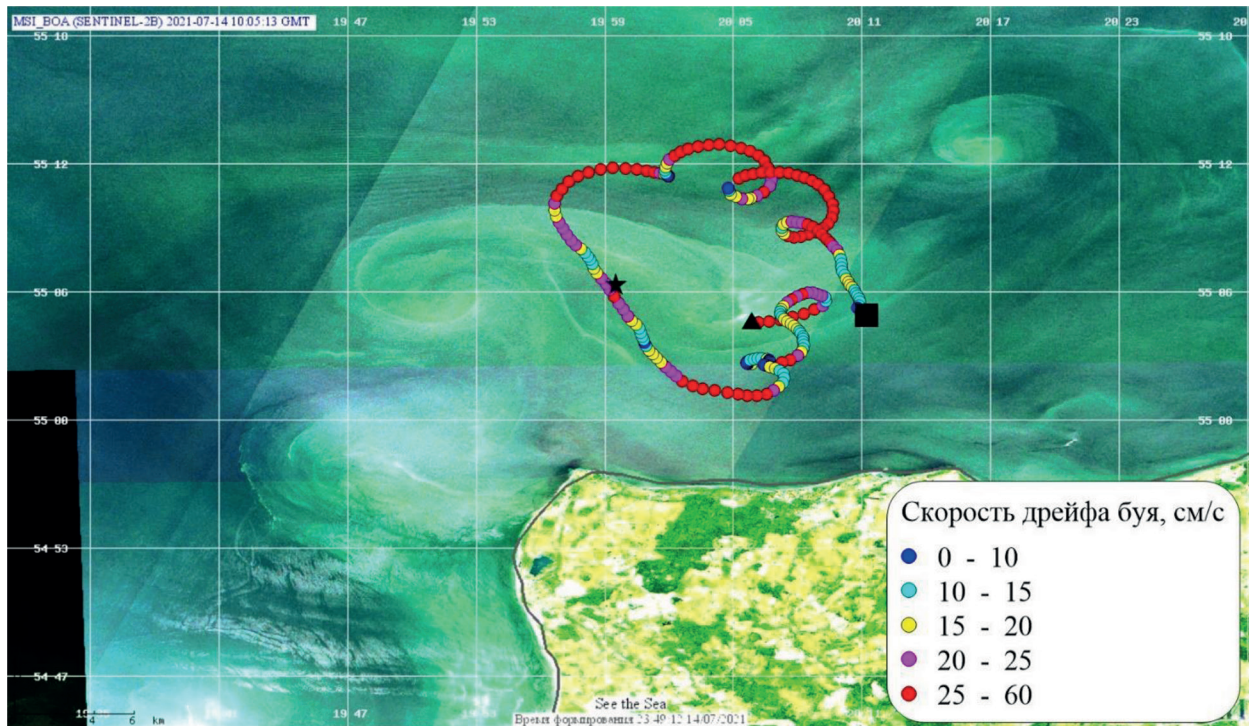


Рис. 9. Карта-схема эксперимента по совместному анализу спутниковой информации и данных экспедиционных исследований. Цветными точками показаны последовательные положения лагранжевого дрейфтера, цветом обозначена средняя скорость движения дрейфтера; чёрным треугольником показана точка запуска дрейфтера; чёрным квадратом — точка окончания эксперимента; чёрной звездой — местоположение дрейфтера в момент получения спутникового изображения

На *рис. 9* показан дрейф лагранжевого дрейфтера за период 11.07.2021, 20:38–17.07.2021, 11:40 (время московское). В момент получения спутникового изображения лагранжевый дрейфтер находился в точке, отмеченной на рисунке чёрной звездой. По цветосинтезированному спутниковому изображению от 14.07.2021 в акватории моря наблюдались два вихревых диполя, один из которых находился в области дрейфа лагранжевого дрейфтера. Процесс формирования интересующего вихревого диполя описан в работе (Краюшкин и др., 2022).

В результате синхронных совместных исследований было показано, что в начальной части дрейфа лагранжевый дрейфтер оставался в строго локализованной области моря, в то время как в момент формирования вихревого диполя характер дрейфа кардинально изменился. Начиная с 13.07.2021, 19:50 дрейфтер был захвачен установившимся течением, возникшим при формировании вихревого диполя, и распространялся в северо-западном направлении со средней скоростью 35–40 см/с. На момент получения спутникового изображения дрейфтер находился в центральной части грибовидной вихревой структуры (в «ножке») и двигался в северо-западном направлении со средней скоростью 23 см/с. В дальнейшем по мере деградации вихревого диполя дрейфтер был выброшен за пределы влияния грибовидной структуры под действием силы инерции и в дальнейшем продолжил своё движение, формируя цепочку инерционных колебаний, характерных для данного региона при отсутствии влияния вихревых структур (Лаврова, Сабинин, 2016). По результатам совместного эксперимента были оценены приповерхностные скорости течений в разных местах вихревых диполей. При зарождении подобных структур в прибрежной зоне моментальная скорость движения пассивных частиц может достигать 40–50 см/с, однако при дальнейшем распространении в акваторию моря скорости внутри центральной «ножки» подобных структур постепенно деградируют. Примечателен тот факт, что структура течений внутри вихревых структур неоднородна во времени: за время эксперимента наблюдалось уменьшение скорости течений до 10–15 см/с с последующим возрастанием до 25 см/с. При этом характерен факт, что за время нахождения лагранжевого дрейфтера в центральной части грибовидного течения инерционных колебаний и других отклонений дрейфа пассивной частицы не отмечалось — распространение дрейфтера происходило в строгом соответствии с направлением распространения основного течения внутри структуры, определённой по спутниковому изображению.

Заключение

Проведение синхронных подспутниковых измерений является необходимым условием для валидации спутниковых данных. Благодаря результатам натурных измерений, которые были собраны сотрудниками лаборатории аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН во время проведения подспутниковых измерений в Чёрном, Балтийском, Каспийском и Азовском морях в 2016–2022 гг., удалось организовать архив и перенести данные для хранения и обработки в веб-сервис, что впоследствии позволило интегрировать натурные измерения в спутниковую информационную систему See the Sea.

Разработанный программный модуль для предобработки первичных данных дрейфтеров позволил стандартизировать и фильтровать измерения, подготавливая их к импорту в веб-сервис. Для хранения журнала экспедиций, а также других экспедиционных данных был разработан интерфейс локальных архивов. Для визуализации и экспорта данных предусмотрен пользовательский интерфейс с различными настройками, в том числе с возможностью просмотра данных на карте.

По результатам интеграции данных мини-дрейфтеров в систему спутникового мониторинга See the Sea представлен программный модуль для визуализации данных с прибора в интерфейсе STS. Это позволяет пользователям применять для проведения работ в STS уже отлаженную и постоянно развивающуюся многофункциональную систему сбора и ведения архивов спутниковых данных, функционирующую в ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Благодаря этим архивам присутствует возможность проводить совместный анализ измерений со спутниковыми и подспутниковыми данными. Функционал включает в себя как одиночный анализ измерений для исследования явлений прибрежных течений, так и совместный анализ для валидации и верификации спутниковых данных.

Результаты совместного анализа в среде STS были использованы для исследования вихревых диполей в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря у побережья Калининградской обл. На настоящий момент в систему STS интегрированы данные более 50 лагранжевых дрейфтеров за период 2016–2022 гг., которые позволяют решать задачи

определения структуры прибрежных течений, исследования проявлений инерционных колебаний (Лаврова, Сабинин, 2016) и восстановления трёхмерной структуры вихревых диполей, которые образовывались в прибрежной зоне Калининградской обл. В работе проиллюстрирован наиболее яркий пример использования совместного анализа данных спутникового зондирования и интегрированных в STS данных лагранжевых дрейфтеров за период 11–17 июля 2021 г.

Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-00269, <https://rscf.ru/project/24-27-00269>.

Литература

1. Елизаров Д. А., Князев Н. А., Лаврова О. Ю. и др. Интеграция в спутниковую информационную систему See the Sea данных акустического доплеровского измерителя течений, полученных в ходе подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 244–253. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253.
2. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р. и др. Трёхмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 265–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
3. Лаврова О. Ю., Сабинин К. Д. Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-21-60-73.
4. Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М., Строчков А. Я. и др. (2019а) Использование мини-дрейфтеров для проведения подспутниковых измерений параметров прибрежных течений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 36–49. DOI: 10.31857/S0205-96142019536-49.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А. и др. (2019б) Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
7. 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.
8. Arabi B., Salama M. S., Pitarch J. et al. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 239. Article 111632. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111632>.
9. Le Hénaff M., Kourafalou V. H., Androulidakis Y. et al. In Situ Measurements of Circulation Features Influencing Cross-Shelf Transport Around Northwest Cuba // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. V. 125. Iss. 7. Article e2019JC015780. <https://doi.org/10.1029/2019JC015780>.
10. Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J. et al. Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Article C05010. DOI: 10.1029/2009JC005863.

A web service for complex analysis of Lagrangian drifters and remote sensing data to study vortex processes in the oceans

D. A. Elizarov, E. V. Krayushkin, O. Yu. Lavrova, A. Ya. Strochkov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia,
E-mail: dimaelik71@gmail.com

The paper presents some results of a new web service for storing and processing oceanographic data as well as integrating data received with Lagrangian drifters into the See the Sea (STS) satellite monitoring system. The data for the web service was collected from 2016 to 2022 in scientific marine expeditions undertaken by Space Research Institute of Russian Academy of Science to study hydrophysical characteristics of coastal marine waters using contact and remote methods. The web service is used for data standardization and storage. Also, it allows exporting oceanographic data for input to STS. For preprocessing measurements from Lagrangian drifters, a Python program is presented that calculates additional parameters such as speed and distance traveled by drifters. This program also serves as a layer between archived data and the web service. The functionality of the web service is shown, allowing you to visualize measurements by coordinates on the built-in map through integration with the Mapbox service. The results of integration with STS are also presented. Here, the handler is integrated as a separate software module, allowing data to be visualized directly in the system interface. This enables conducting joint analysis of field measurement data, satellite images, and other thematic data. The results from the joint analysis in an STS environment have been used to study eddy dipoles in the coastal zone of the southeastern part of the Baltic Sea, off the coast of Kaliningrad, specifically to describe the 3D structure of currents within the eddy dipoles.

Keywords: See the Sea, combined satellite and *in situ* monitoring, Lagrangian drifter, web service, data processing and storage, data visualization, Python, vortex processes

Accepted: 08.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-300-312

References

1. Elizarov D. A., Knyazev N. A., Lavrova O. Yu. et al., Integration into the See the Sea information system of Acoustic Doppler Current Profiler data obtained concurrently with satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 244–253 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253.
2. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R. et al., Three-dimensional structure and dynamics of waters in coastal eddy dipoles in the southeastern Baltic Sea: Results of concurrent satellite and field measurements in summer 2021, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 265–279 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
3. Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 60–73 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-21-60-73.
4. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov A. Ya. et al. (2019a), The use of mini-drifters in coastal current measurements conducted concurrently with satellite imaging, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 5, No. 5, pp. 36–49 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-96142019536-49.
5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A. et al. (2019b), Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
7. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Proshin A. A., Uvarov I. A., Flitman E. V., The GEOSMIS system: developing interfaces to operate data in modern remote monitoring systems, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108 (in Russian).

8. Arabi B., Salama M.S., Pitarch J. et al., Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 239, Article 111632, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111632>.
9. Le Hénaff M., Kourafalou V.H., Androulidakis Y. et al., In Situ Measurements of Circulation Features Influencing Cross-Shelf Transport Around Northwest Cuba, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2020, Vol. 125, Issue 7, Article e2019JC015780, <https://doi.org/10.1029/2019JC015780>.
10. Marmorino G.O., Holt B., Molemaker M.J. et al., Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Article C05010, DOI: 10.1029/2009JC005863.