

ГИС-подход в задачах спутниковой океанологии — дальнейшее развитие

С. К. Клименко, А. Ю. Иванов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: klimenko.sk@ocean.ru

Представлены ключевые результаты доработки геоинформационного подхода, разработанного для решения комплекса океанографических задач с использованием анализа данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Модернизация геоинформационного подхода заключается в регулярном обновлении информации и интеграции дополнительных актуальных цифровых данных об акватории того или иного моря. Эти улучшения направлены на повышение эффективности обнаружения и определения природы различных явлений и процессов, происходящих на морской поверхности, в частности, антропогенных и естественных плёночных загрязнений, а также их источников. В усовершенствованной версии геоинформационного подхода, при наличии полной физико-географической и индустриальной информации о морском бассейне, источники загрязнения могут быть выделены практически автоматически. Необходимость постоянного совершенствования метода подтверждается на примере поиска, идентификации и верификации источников плёночных загрязнений на фоне других явлений в акватории Чёрного моря с помощью космической оптической и радиолокационной съёмки в период с 2020 по 2024 г.

Ключевые слова: геоинформационные системы, ГИС-подход, космическая радиолокация, плёночные загрязнения, Чёрное море

Одобрена к печати: 24.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-288-301

Введение

Геоинформационные системы (ГИС) — это современные технологии, предназначенные для создания, визуализации, управления, анализа и картографирования пространственных и атрибутивных данных, полученных из различных источников (DeMers, 2009). На протяжении длительного времени ГИС являются одним из основных инструментов анализа пространственных данных в географии.

Геоинформационные системы обычно включают в свой состав пространственные базы данных, архивы данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), графические редакторы и различные встроенные инструменты для пространственного анализа данных. Геоинформационные системы находят широкое применение в различных научных и прикладных областях, включая океанологию, где они используются для комплексного изучения процессов, происходящих в Мировом океане.

Геоинформационные системы и методы исследований на их основе представляют собой одно из наиболее эффективных средств для сбора, хранения, графической визуализации и анализа результатов измерений и данных о пространственно распределённых объектах (DeMers, 2009). ГИС-подход к решению задач в области океанологии основывается на сборе и интеграции разнообразных геопро пространственных данных о водных объектах, их состоянии и происходящих в них процессах и явлениях. Эти данные включают информацию, полученную с использованием методов ДЗЗ, а после проведения их интерактивного анализа становится возможным выявление закономерностей и тенденций в развитии природных и антропогенных процессов в морях и океанах (Чандра, Гош, 2008; Mehta, 2014).

Данный метод широко используется для исследования различных морских явлений, включая внутренние волны, апвеллинги, речные выносы, аномальные цветения фитопланктона, морской лёд и др. (Иванов и др., 2018; Новикова и др., 2017; Khlebnikov et al., 2023).

Кроме того, он применяется для анализа атмосферных явлений над океаном, которые проявляются как в полях облачности, так и на поверхности моря — атмосферные фронты, циклоны, местные ветры (рис. 1) (Иванов, 2014, 2016, 2018).

ГИС-подход применяется для мониторинга, обнаружения и идентификации плёночных загрязнений (нефти, нефтепродуктов и прочих маслянистых веществ) на основе анализа данных ДЗЗ, главным образом радиолокационных. Основной проблемой становится различение пятен на морской поверхности от областей выглаживания, возникающих под воздействием атмосферных или океанических процессов (штиль, апвеллинг, начальные формы льда и др.), и которые так же, как и плёночные загрязнения, отображаются на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности тёмным тоном (Иванов, 2007). Определение источников загрязнения, расположенных на морском дне, также продолжает оставаться актуальным вопросом. ГИС-методы представляются наиболее эффективным инструментом для решения данных проблем.

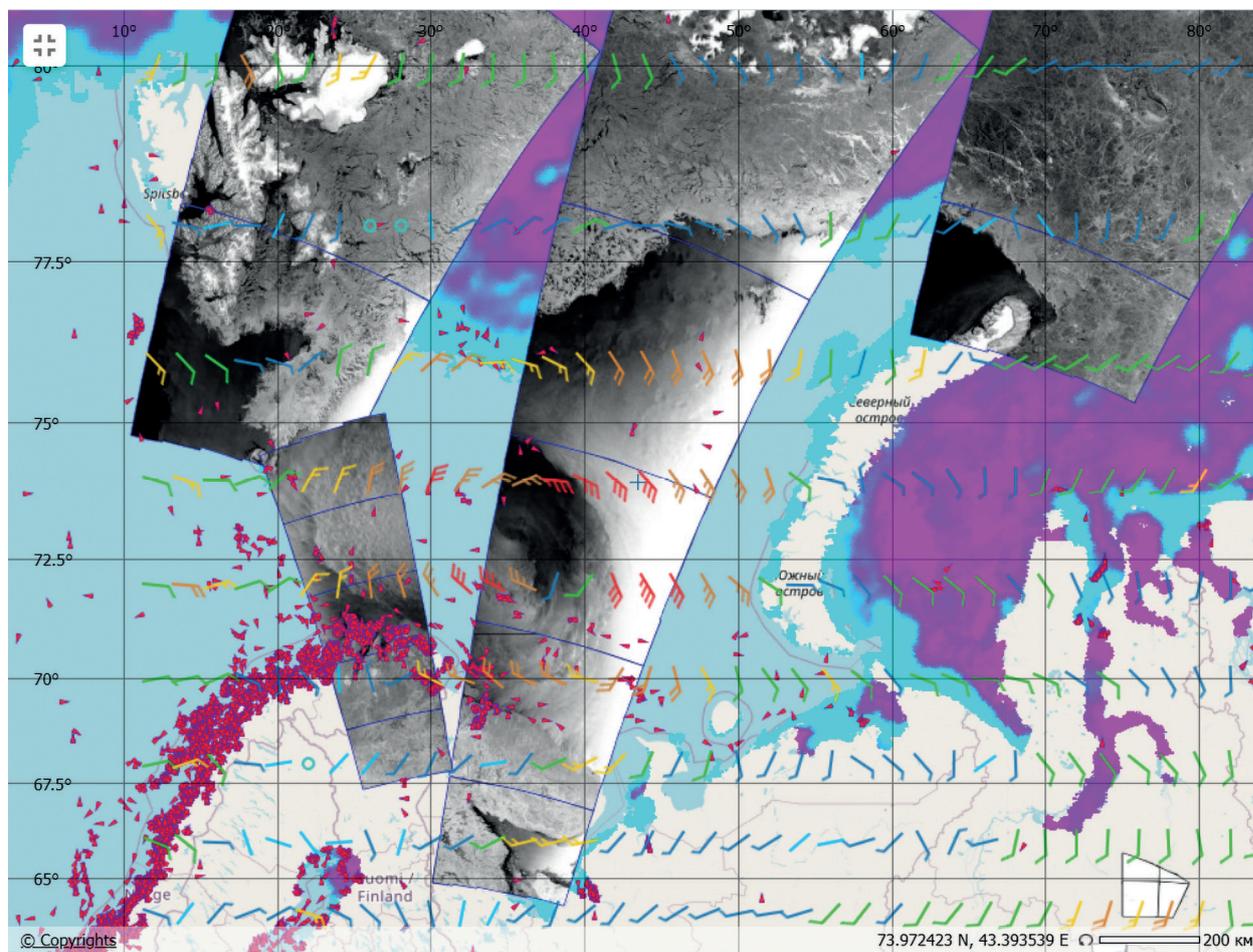


Рис. 1. Фрагмент обзорной карты Баренцева моря в веб-ГИС-приложении «Геомиксер», на которой представлены: поле ветра (флаги; прогнозная модель GFS), концентрация морского льда (показана цветом; по данным радиометра AMRS-2) и полосы радиолокационной съёмки (Sentinel-1A), а также судовая обстановка (маленькие красные треугольники) на 24.01.2025; в поле ветра и на РЛИ морской поверхности отобразился полярный циклон. © NSIDS, ESA

Основные положения и принципы ГИС-подхода для мониторинга морской поверхности и обнаружения источников загрязнения были описаны в статье (Иванов, Затягалова, 2007), а сам подход далее использован для исследований различных акваторий РФ (см. (Затягалова, 2012; Иванов и др., 2020; Клименко, Иванов, 2025; Клименко и др., 2022)). Объединение

доступных геопространственных данных для интерпретации спутниковых изображений с целью мониторинга различных морей России применялось в работах (Лаврова и др., 2011, 2016, 2022). В ряде исследований (см., например, (Akinwumiju et al., 2020; Bing et al., 2019; Wang et al., 2023)) ГИС-подход используется для оценки рисков распространения нефтяных разливов на основе пространственно-временных характеристик исследуемых акваторий и численного моделирования. Наряду с этим ГИС-подход может обеспечить анализ массива архивных многолетних спутниковых данных для углублённого исследования и оценки ущерба от разливов нефти в море (Abdunaser, 2022; Aukett, 2012; Sunkur, Bokhoree, 2021). Также ГИС могут быть использованы не только для предоставления основной информации о нефтяных разливах, но и для проверки и повышения эффективности моделей машинного обучения (выделения пятен) (Lau, Huang, 2024).

В рамках задач мониторинга состояния акватории необходимо иметь информацию о пространственном распределении пятен плёночных загрязнений, а также набор данных об океанографических, гидрометеорологических, навигационных и промышленных характеристиках данной акватории. Эти данные включают в себя информацию о батиметрии, ветровых полях, нефтегазовом комплексе, судовой обстановке, а также любые другие доступные сведения о водном бассейне, которые могут быть полезны для определения мест обнаружения пятен загрязнения. Данные аккумулируются в специализированных ГИС-порталах в виде отдельных тематических слоёв, где на основе всей собранной информации создаются карты распределения плёночных загрязнений, анализ которых позволяет, в том числе, сделать выводы об интенсивности загрязнения исследуемой акватории. Подобные карты представляют собой полноценный информационный продукт, который даёт возможность не только получить данные о пространственно-временном распределении загрязнений, но и выявить их источники, установить взаимосвязи между ними, определить характеристики обнаруженных загрязнений и многое другое.

Материалы и методы

К современным отечественным ГИС-сервисам можно отнести, например, веб-ГИС-приложение «Геомиксер» (Иванов и др., 2014), спутниковый сервис See the Sea (Лупян и др., 2012), цифровую платформу Sloyka (Калиниченко и др., 2024), аналитическую платформу CLASS.PRO (<https://class-cloud.ru/products/class>) и др. Рассмотрим применение ГИС-подхода на примере проекта, создаваемого в картографическом веб-ГИС-приложении «Геомиксер» российской группы компаний «СКАНЭКС» (<http://geomixer.ru>), реализованного на основе соответствующих идей А. Ю. Иванова (Иванов, 2007), О. Мюлленхоффа с коллегами (Müllenhoff et al., 2008), Л. Окетт (Aukett, 2012) и других, где, в том числе, происходит визуализация спутниковых изображений и их анализ.

Приложение «Геомиксер» представляет собой веб-геоинформационную платформу, предназначенную для решения широкого спектра задач (Иванов и др., 2014). Благодаря усилиям специалистов Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, данное приложение стало использоваться в области океанологии для выполнения специализированных исследований. Платформа обеспечивает интеграцию и управление разнородными пространственными данными (в том числе данными численного моделирования), позволяя осуществлять их объединение в рамках одного проекта, поддерживая все ГИС-форматы данных. В результате пользователь получает возможность комплексного представления разнообразных данных в виде интерактивных карт, порталов и сервисов в режиме реального времени.

Главная особенность веб-ГИС-приложений заключается в интеграции внешних данных, включая информацию из общедоступных источников. Основа этих данных — продукты ДЗЗ, находящиеся в открытом доступе (рис. 2, см. с. 291). В настоящее время реализована возможность автоматической загрузки спутниковых снимков — как радиолокационных (Sentinel-1), так и оптических (Sentinel-2, Landsat-8/-9, Aqua/Terra, Suomi NPP (англ. National Polar-orbiting Partnership), NOAA-20/-21 и др.).

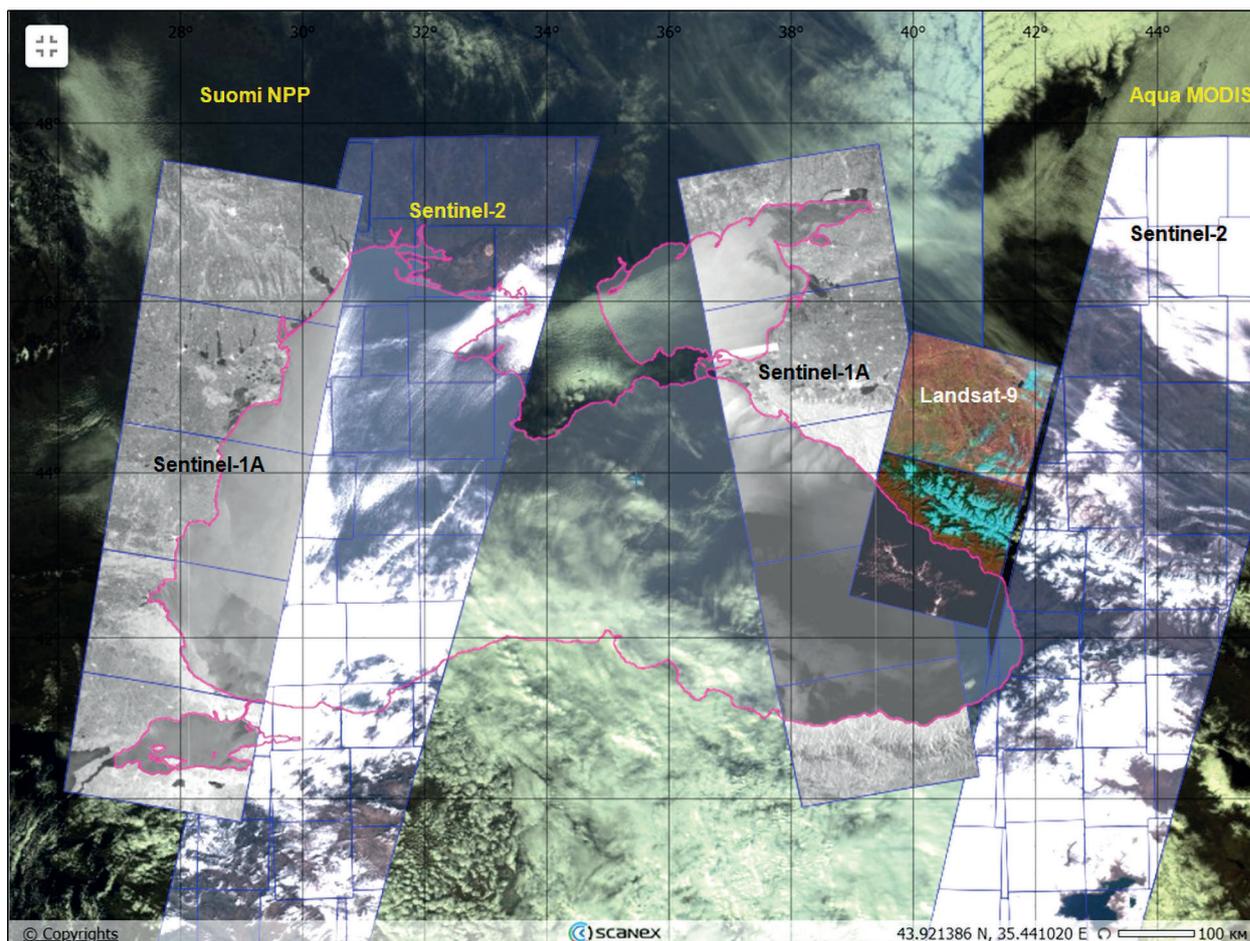


Рис. 2. Покрывание спутниковыми данными Чёрного моря в приложении «Геомиксер»: показаны полосы Sentinel-1A, Sentinel-2, Landsat-9, Suomi NPP и Aqua MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer); случай 12.02.2025

Интерфейс нового проекта в приложении «Геомиксер» представляет собой базовую карту (например, OSM (англ. Open Street Map)), где в режиме персонального доступа есть возможность добавлять любые цифровые данные с дополнительной информацией о водном бассейне в виде отдельных слоёв в векторном и растровом форматах.

Для реализации возможностей ГИС-подхода необходимо осуществить интеграцию соответствующего набора данных, специфичного для каждого конкретного проекта. В случае мониторинга плёночных загрязнений (рис. 3, см. с. 292) этот набор данных должен включать данные о батиметрии (карты или набор изобат), судоходных трассах, судовой обстановке из автоматических систем идентификации судов и о гидрометеорологических условиях, главным образом скорости ветра, и базовую пространственную информацию о водном бассейне. Она подразумевает под собой данные о нефтегазовых бассейнах и основных геолого-геоморфологических элементах и структурах морского дна (известные грязевые вулканы, сипы, грифоны), инфраструктуре нефтегазового комплекса, прибрежной промышленности и канализационных системах и т. п. — т. е. обо всех возможных источниках плёночных загрязнений.

Для их поиска и идентификации в настоящее время используются РЛИ европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, полученные в режиме широкого обзора IW (англ. Interferometric Wide) (полоса обзора 250 км, разрешение 10 м) или сверхширокого обзора EW (англ. Extra Wide) (400 км, 40 м). Их выбор обусловлен рядом преимуществ, среди которых можно отметить независимость от гидрометеорологических условий и освещённости во время съёмки, а также высокую чувствительность к шероховатости морской поверхности, что и позволяет наиболее эффективно обнаруживать пятна плёночных загрязнений на РЛИ.

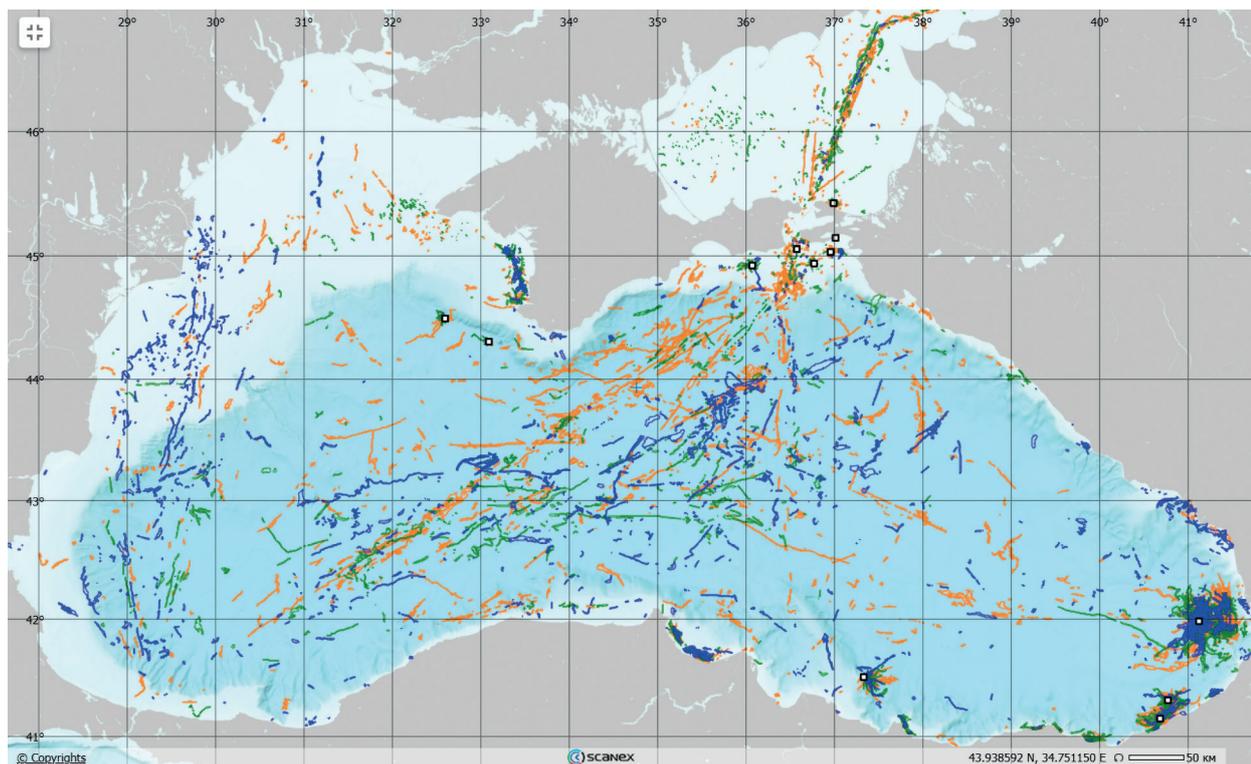


Рис. 3. Результаты мониторинга плёночных загрязнений Чёрного моря 2020–2023 гг.; помимо пятен судовых разливов показаны впервые обнаруженные, а также дополнительно верифицированные естественные нефтепроявления (квадраты) в ходе мониторинга благодаря ГИС-подходу. В качестве подложки использована карта подводного рельефа (GEBCO)

В ходе мониторинга акватории Чёрного моря визуальным методом (Иванов, 2007) был обнаружен ряд плёночных загрязнений, которые либо не соответствовали существующим классификациям, либо для их идентификации не было достаточно достоверной имеющейся информации. Для обнаружения плёночных загрязнений и выявления источников требовались новые данные, что привело к необходимости модификации ГИС-подхода. Для этого в ГИС-проект были включены дополнительные актуальные данные из разных источников, появившиеся в последнее время. Например, для акватории Чёрного моря для более надёжной идентификации источников загрязнения на портал были добавлены данные:

- 1) об обновлённой детальной структуре нефтегазового комплекса;
- 2) о рейдовых и якорных стоянках;
- 3) прибрежной промышленности (перегрузочных терминалах, нефтеперерабатывающих заводах, рыбоперерабатывающих предприятиях и т. п.);
- 4) местах сброса очищенной и неочищенной канализации;
- 5) затонувших судах;
- 6) об основных геолого-геоморфологических элементах и структурах морского дна (грязевых вулканах, сипах, грифонах и т. п.);
- 7) о местах разведения марикультуры;
- 8) зонах рыболовства.

В результате модернизации ГИС-подхода в рамках мониторинга Чёрного моря 2020–2024 гг. были выявлены новые источники антропогенного загрязнения акватории, а также обнаружены новые места естественных нефтепроявлений.

Результаты

В данном разделе представлены результаты последних исследований, полученные с применением обновлённого ГИС-подхода. Основное внимание уделяется изучению плёночных загрязнений Чёрного моря.

Затонувшие суда

В период с июля по октябрь 2021 г. при входе в Цемесскую бухту были обнаружены плёночные загрязнения неизвестного происхождения. На их антропогенную природу могла указывать расположенная восточнее рейдовая стоянка порта Новороссийск, однако отсутствие судов в районе предполагаемого источника и пространственно-временная группировка пятен свидетельствовали о наличии стационарного подводного источника на дне (Кучейко и др., 2022). В ходе дальнейшего исследования навигационной карты (*англ.* Navionics Marine Charts) было установлено, что в данной акватории в 1986 г. затонул пароход «Адмирал Нахимов». Таким образом, в результате комплексного анализа оптических снимков и всей доступной информации об акватории, включая данные и об особом районе катастрофы, было однозначно установлено, что источником обнаруженных разливов является именно пароход «Адмирал Нахимов».

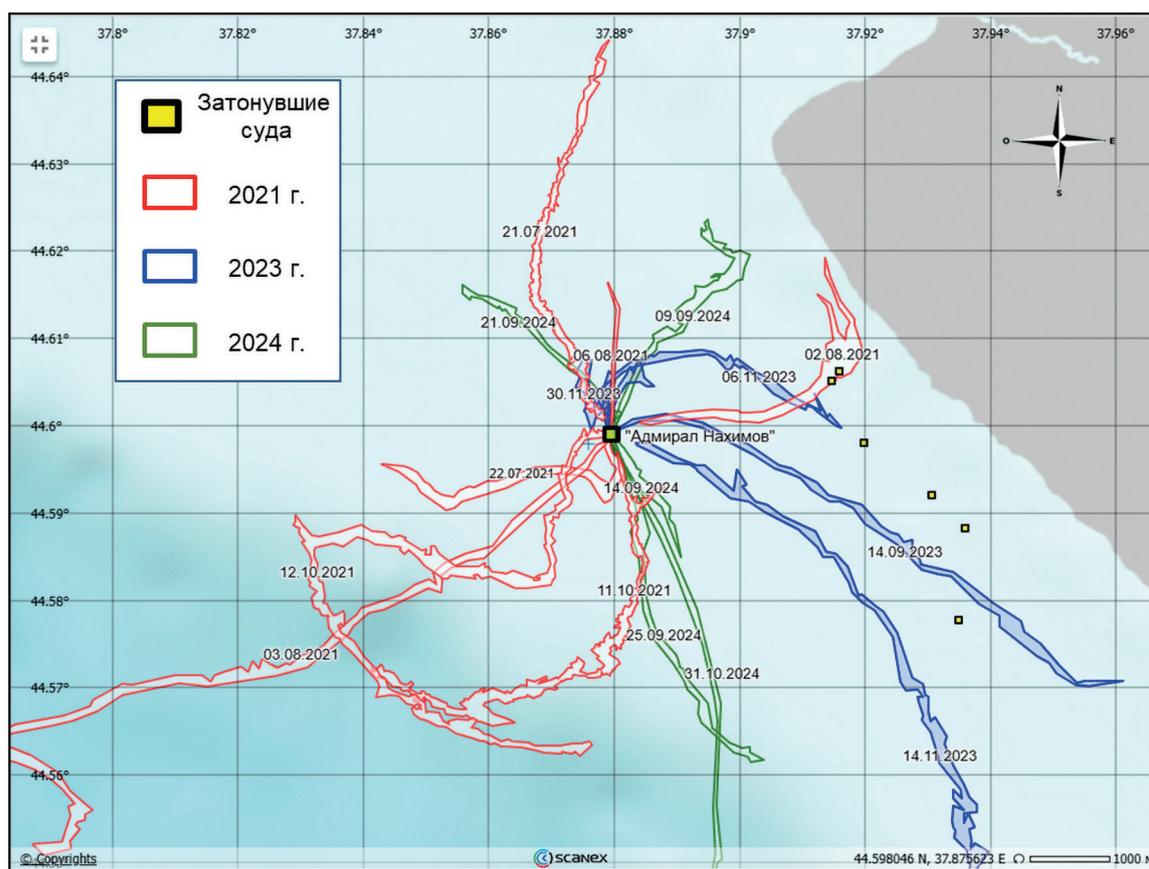


Рис. 4. Пространственно-временная группировка разливов парохода «Адмирал Нахимов» в период 2021–2024 гг.

Факт утечек нефтепродукта подтвердили специалисты ФГБУ «АМП Черного моря», работавшие в данном месте после поступления информации о нефтяных пятнах; более подробно об этом в работе (Кучейко и др., 2022).

Найденные в 2023–2024 гг. в районе крушения парохода слики, исходящие из указанной на карте точки, уже однозначно интерпретировались как разливы «Адмирала Нахимова». Проведённый анализ показал сезонный характер их проявления — они обнаруживались преимущественно в летне-осенний период (рис. 4, см. с. 293). Для точной идентификации других источников (например, природных в районе Керченского предпроливья) в ГИС были интегрированы данные о положении известных затонувших судов российского сектора Чёрного моря.

Марикультура

Другим антропогенным источником плёночных загрязнений, обнаруженным с помощью ГИС-подхода, стала марикультура в виде рыбоводных ферм, отходы которых ранее наблюдались, но не рассматривались как плёночные загрязнения. Преимущественно источники расположены в южной части Чёрного моря — подавляющее большинство подобных сликов (более 90 %), представляющих собой маслянистые вещества, содержащие рыбий жир (или его аналоги), установлено в территориальных водах Турции.

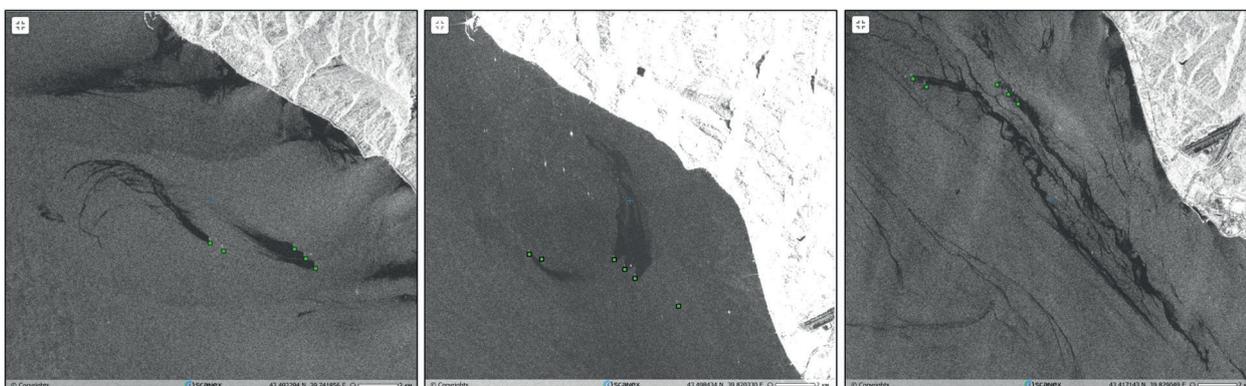


Рис. 5. Плёночные загрязнения марикультуры на фрагментах радиолокационных изображений Sentinel-1A; Чёрное море, район Кудепста – Адлер (29.02, 25.03 и 05.04.2024). © ESA

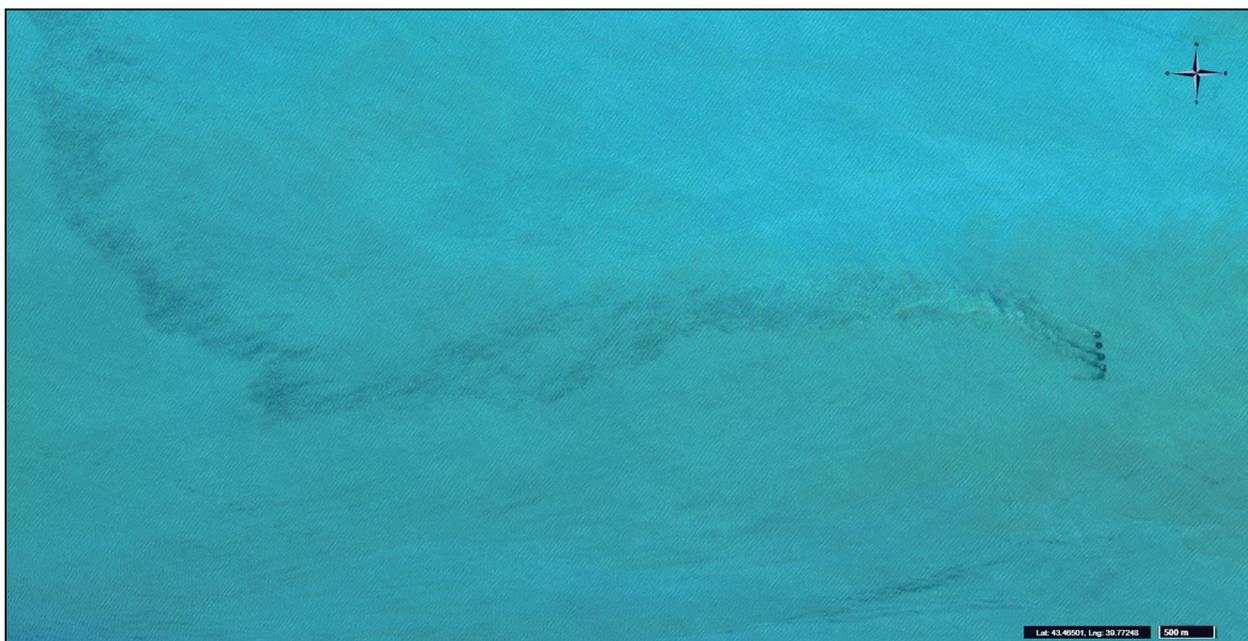


Рис. 6. Рыбоводные садки в акватории прибрежной зоны Адлер – Кудепста и их плёночные загрязнения на фрагменте оптического изображения Sentinel-2 (19.06.2022). © ESA

У побережья, на участке шельфа между городами Синоп и Хопа, расположены рыболовные фермы, хорошо различимые как на РЛИ, так и на оптических снимках. В период с 2020 по 2024 г. наблюдалось увеличение общего количества ферм в море с 27 до 79, что также привело к увеличению количества наблюдаемых на РЛИ пятен. В период с июня по сентябрь установлено минимальное количество снимков, вплоть до их полного отсутствия. Например, в 2023 г. в период с декабря по май разливы от марикультуры в среднем отображались на 15–20 РЛИ, тогда как в период с июня по июль — на 5–10 РЛИ, а с августа по октябрь при благоприятных гидрометеорологических условиях (скорость ветра менее 9 м/с) не отображались вовсе. Это объясняется сезонностью выращивания особей в зимне-весенний период и сбором рыбы в период с апреля по июнь.

В рамках мониторинга аквафермы были найдены и в российском секторе Чёрного моря (рис. 5, см. с. 294). С апреля 2022 г. на РЛИ прибрежной зоны Адлер–Кудепста обнаруживались слики, пространственно-временная группировка которых характеризовалась веерными структурами, что обычно характерно для стационарных источников. Анализ показал, что данные пятна имеют антропогенное происхождение, на что указывали группы светлых точек на РЛИ, к которым тяготели пятна и которые благодаря оптическим снимкам Sentinel-2 (рис. 6, см. с. 294) и Landsat-8 были однозначно идентифицированы как рыболовные фермы садкового типа (Иванов, Клименко, 2024).

Прибрежные загрязнения — рыболовство и рыбопереработка

В зимне-весенний период 2022–2024 гг. в акватории Чёрного моря у побережья Абхазии периодически появлялись обширные пятна большой площади — в некоторых случаях совокупно она достигала более 100 км². Подобные слики наблюдались здесь и ранее — в январе 2020 г.

В рамках ГИС-подхода после нанесения на карту объектов рыбной промышленности данного региона был однозначно установлен источник загрязнений — абхазские рыбоперерабатывающие заводы, расположенные на побережье юго-восточной части моря (рис. 7) и сбрасывающие отходы рыбопереработки без предварительной очистки. Пик активности предприятий и, соответственно, наибольшее количество плёночных загрязнений от них приходится на сезон рыбной путины — с декабря по март.

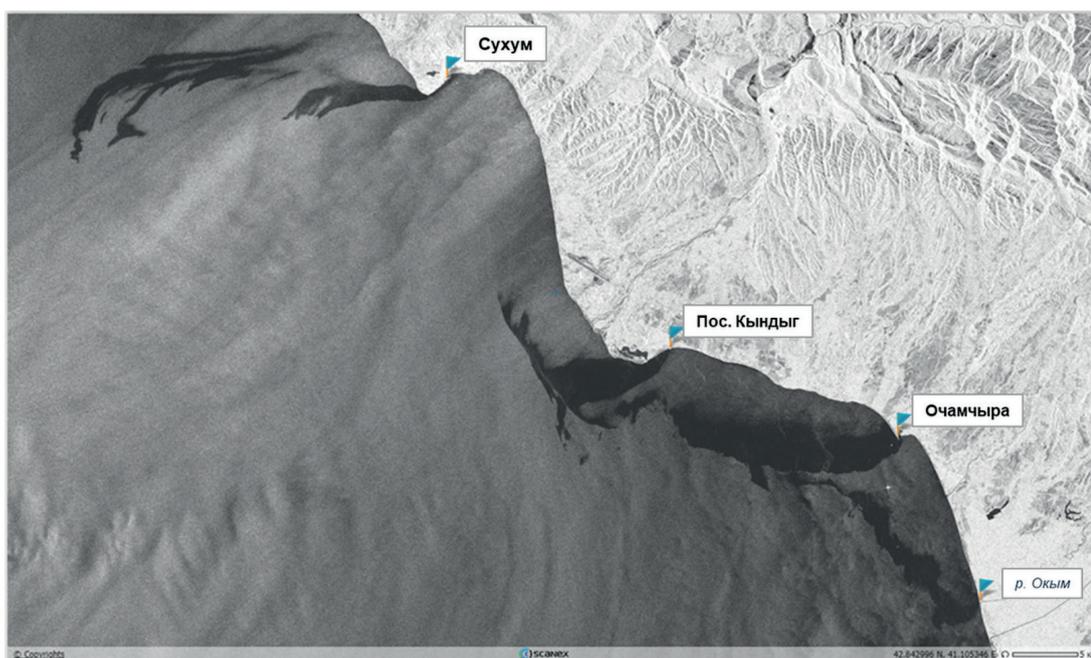


Рис. 7. Крупные слики на радиолокационном изображении Sentinel-1A (08.01.2024, 15:11 UTC (англ. Coordinated Universal Time)) и места сброса отходов рыбопереработки в море (флажки). © ESA

Аварийный разлив в Керченском проливе

На входе в Керченский пролив 15 декабря 2024 г. во время сильного шторма потерпели крушение два российских танкера «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239», суммарно перевозивших около 9 тыс. т мазута. В результате их крушения произошло массовое загрязнение нефтепродуктами Керченского предпроливья, самого пролива, прибрежной акватории Чёрного моря вплоть до города Анапы и побережья Крыма.

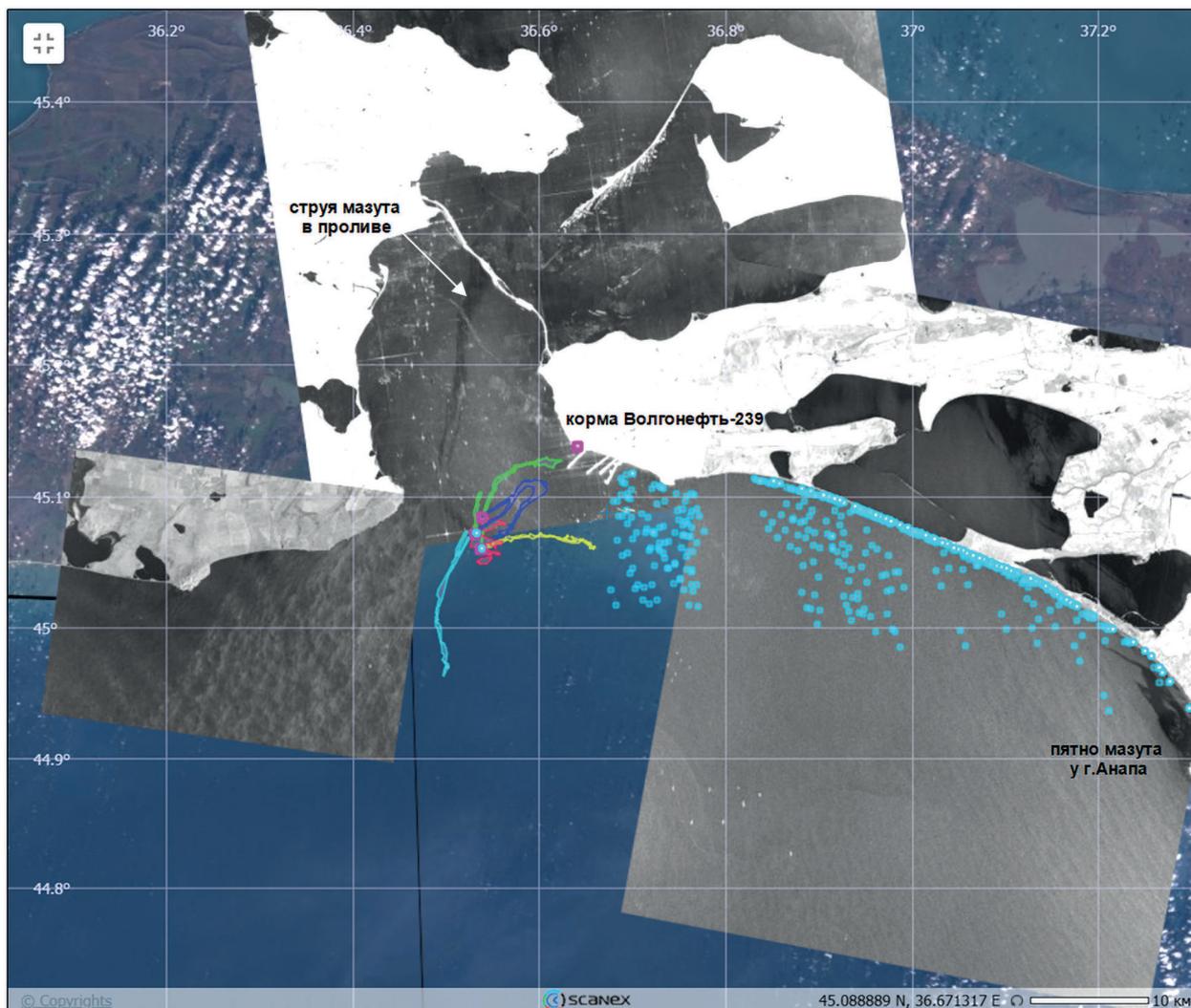


Рис. 8. Мониторинг катастрофического разлива в Керченском предпроливье, произошедшего 15.12.2024. Показаны РЛИ, полученные в рамках Международной хартии по космосу и крупным катастрофам, части затонувших танкеров, обнаруженные пятна мазута (цветные контуры) и результаты моделирования дрейфа от 19.12.2024 с помощью модели ScanDrifter (голубые квадратики)

Анализ ситуации с использованием данных ДЗЗ позволил объективно оценить результаты крушения танкеров в Керченском предпроливье. Впервые место катастрофы в разрывах облачности отобразилось на оптических снимках уже 16.12.2024 (MODIS/Terra, Pleiades-1A и др.), однако только радиолокационные данные спутника Sentinel-1A, полученные 18.12 и 19.12.2024, а также последующие съёмки, покрывающие акваторию предпроливья, однозначно показали реальную ситуацию в условиях плохой погоды (при скорости ветра более 9 м/с). В качестве дополнительного источника информации активно использовались данные численного моделирования дрейфа пятен, а именно модели ScanDrifter, интегрированной в портал «Геомиксер». Комплексный анализ происшествия с применением ГИС-подхода

однозначно показал: 1) что разливы происходят от затонувших частей танкеров, 2) пятна имеют вытянутую форму и дрейфуют под действием переменных течений, вызванных сильным ветром, часто изменяющим своё направление (рис. 8, см. с. 296) (Последствия..., 2024; Радиолокационная..., 2025).

Естественные нефтепроявления

Кроме техногенных источников загрязнений с использованием ГИС-подхода был выявлен ряд новых природных источников нефтепроявлений в Чёрном море: среди 28 установленных источников 8 были обнаружены впервые (Клименко, Иванов, 2025). Источники естественных нефтепроявлений тяготеют к нефтегазоносным бассейнам, преимущественно располагаясь в областях грязевого вулканизма (Иванов и др., 2020), поэтому для верификации найденных в ходе мониторинга снимков потребовалась актуальная информация о нефтегазовых бассейнах, распространении грязевого вулканизма и донных эруптивных структурах (Клименко, Иванов, 2025).

Благодаря проведённой модификации новые естественные нефтепроявления были обнаружены в керченском предпроливье Чёрного моря (Клименко и др., 2022), в Кизилташском лимане, в грузинском секторе в пределах Гурийского прогиба к юго-западу от города Поты (где с учётом ранее выявленных всего установлено 16 источников), в турецком секторе в акватории провинции Ризе, а также в северо-западной части моря — в районе материкового склона в границах Одесско-Синопской разломной зоны (Клименко, Иванов, 2025).

Заключение

Таким образом, основные усовершенствования ГИС-подхода можно сформулировать следующим образом:

1. Загрузка принципиально новой доступной пространственной информации для идентификации ранее неидентифицируемых объектов загрязнения на морской поверхности.
2. Обновление данных об океанографических, гидрометеорологических, навигационных и промышленных характеристиках исследуемой акватории для более точной идентификации и классификации источников загрязнения морской поверхности.
3. Оперативный анализ аварийных случаев нефтяных разливов с возможностью оценки последствий и сравнения полученных результатов с данными численного моделирования.
4. Использование массива архивных векторных данных обнаруженных плёночных загрязнений, собранных и визуализированных в рамках веб-ГИС-приложения, для анализа новых случаев загрязнения и дешифрования сложных сцен на РЛИ, где происходит наложение нескольких явлений, образующих области выглаживания на морской поверхности.
5. Обнаруженные и верифицированные источники загрязнений автоматически интегрируются в систему как дополнительные информационные объекты для будущего анализа.

В результате анализа данных ДЗЗ и последующего внесения дополнительной информации в ГИС были выявлены новые источники антропогенного плёночного загрязнения моря, такие как прибрежная марикультура, отходы рыбопереработки и затонувшие суда. Кроме того, было обнаружено несколько новых источников естественных нефтепроявлений в разных частях Чёрного моря. Данные источники загрязнения после их верификации также были включены в ГИС-проект, что позволяет непрерывно обновлять его для следующих исследований, в том числе для дешифрования сложных сцен, где есть пересечение нескольких сликообразующих явлений.

В итоге показана эффективность метода, получившего название геоинформационный подход, для обнаружения и идентификации пятен плёночных загрязнений и их источников посредством постоянного обновления цифровой информации об акватории того или иного моря. В его рамках при наличии полной физико-географической, гидрометеорологической и индустриальной информации о морском бассейне источники загрязнения, в том числе и ранее неизвестные, выделяются практически автоматически. Подобный подход можно использовать для мониторинга и исследования большинства явлений и процессов в Мировом океане.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ FMWE-2024-0015. Авторы благодарят группу компаний «СКАНЭКС» за возможность использования ресурсов проектов, созданных на базе веб-ГИС-приложения «Геомиксер».

Литература

1. *Затягалова В. В.* Геоинформационный подход при мониторинге загрязнения моря по данным дистанционного зондирования Земли из космоса // *Науки о Земле*. 2012. № 2. С. 80–86.
2. *Иванов А. Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 3. С. 73–96.
3. *Иванов А. Ю.* Атмосферный фронт над Каспийским морем по радиолокационным, оптическим и метеорологическим данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2014. № 4. С. 16–26. DOI: 10.7868/S0205961414040071.
4. *Иванов А. Ю.* Новоземельская бора и полярные циклоны по данным космических радиолокационных и оптических съемок // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 4. С. 9–22. DOI: 10.7868/S0205961416040035.
5. *Иванов А. Ю.* Мезомасштабные атмосферные циклонические вихри над Черным и Каспийским морями по данным спутникового дистанционного зондирования // *Исслед. Земли из космоса*. 2018. № 1. С. 12–26. DOI: 10.7868/S0205961418010025.
6. *Иванов А. Ю., Затягалова В. В.* Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 6. С. 46–63.
7. *Иванов А. Ю., Клименко С. К.* Марикультура в Черном море и ее влияние на окружающую среду по данным спутниковых наблюдений // *Экология и промышленность России*. 2024. Т. 28. № 4. С. 34–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-4-34-39.
8. *Иванов А. Ю., Потанин М. Ю., Филимонова Н. А., Евтушенко Н. В., Антонюк А. Ю.* Оперативный мониторинг морских акваторий: новые геоинформационные решения и интернет-технологии // *Земля из космоса — наиболее эффективные решения*. 2014. Т. 2. № 18. С. 28–36.
9. *Иванов А. Ю., Хлебников Д. В., Коновалов Б. В. и др.* Особенности отображения выносов рек в Чёрном море в данных дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202.
10. *Иванов А. Ю., Матросова Е. Р., Кучейко А. Ю. и др.* Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокации // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 5. С. 43–62. DOI: 10.31857/S0205961420050061.
11. *Калиниченко В. О., Илюшина П. Г., Успенская Е. И., Сергеева Е. С., Садовничий Р. В., Семенова М. И., Шабалин Н. В.* Цифровые решения для шельфа // *Деловой журн. Neftegaz.RU Offshore*. 2024. № 7. С. 14–20.
12. *Клименко С. К., Иванов А. Ю.* Современное распределение и верификация источников естественных нефтепроявлений Азово-черноморского бассейна // *Океанология*. 2025. Т. 65. № 3. С. 366–382. DOI: 10.31857/S0030157425030022.
13. *Клименко С. К., Иванов А. Ю., Терлеева Н. В.* Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // *Исслед. Земли из космоса*. 2022. № 3. С. 37–54. DOI: 10.31857/S0205961422030071.
14. *Кучейко А. А., Иванов А. Ю., Клименко С. К. и др.* Наблюдение и оперативное спутниковое сопровождение случаев аварийных нефтяных разливов и утечек в прибрежной зоне Черного моря // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 10. С. 52–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-10-52-59.

15. 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. 480 с.
16. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
17. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
18. Лупян Е. А., Матвеев А. А., 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. 251–261.
19. Новикова А. М., Каширина Е. С., Новиков А. А. и др. ГИС в морских исследованиях: мировой опыт и возможности его применения на примере черноморского региона // Тр. Карадагской науч. станции им. Т. И. Вяземского — природного заповедника РАН. 2017. № 1(3). С. 54–66. DOI: 10.21072/есо.2021.03.05.
20. Последствия техногенной экологической катастрофы в Черном море будут ошутимы на протяжении всего 2025 г. — экспертный анализ спутниковых снимков // <https://www.scanex.ru/>. 25.12.2024. <https://www.scanex.ru/company/news/posledstviya-tekhnogennoy-ekologicheskoy-katastrofy-v-chernom-more-budut-oshchutimy-na-protyazhenii-/>.
21. Радиолокационная съёмка показывает, что в Черном море продолжаются техногенные разливы мазута // <https://www.scanex.ru/>. 13.01.2025. <https://www.scanex.ru/company/news/rli-pokazyvayut-cto-v-chernom-more-prodolzhayutsya-tekhnogennye-razlivy-mazuta-/>.
22. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
23. Abdunaser K. Oil pollution monitoring and detection using GIS and remote sensing techniques: A case study from Libya // Environmental Applications of Remote Sensing and GIS in Libya. Cham: Springer, 2022. P. 227–243.
24. Akinwumiju A. S., Adelodun A. A., Ogundejì S. E. Geospatial assessment of oil spill pollution in the Niger delta of Nigeria: An evidence-based evaluation of causes and potential remedies // Environmental Pollution. 2020. V. 267. Article 115545. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115545.
25. Aukett L. The use of geographical information systems (GIS) in oil spill preparedness and response // Intern. Conf. “Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production”. Australia, 2012. Article SPE-157384-MS. DOI: 10.2118/157384-MS.
26. Bing L., Xing Q.-G., Liu X., Zou N.-N. Spatial distribution characteristics of oil spills in the Bohai Sea based on satellite remote sensing and GIS // J. Coastal Research. 2019. V. 90. Iss. SI. P. 164–170.
27. DeMers M. N. Fundamentals of Geographic Information Systems. 4th ed. USA: John Wiley and Sons, 2009. 443 p.
28. Khlebnikov D. V., Ivanov A. Yu., Evdoshenko M. A., Klimenko S. K. Manifestations of upwellings in the Black Sea in multisensor remote sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. P. 1435–1449. DOI: 10.1134/S0001433823120137.
29. Lau T. K., Huang K. H. A timely and accurate approach to nearshore oil spill monitoring using deep learning and GIS // Science of the Total Environment. 2024. V. 912. Article 169500. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169500.
30. Mehta S. P. GIS application in oceanography // Intern. J. Scientific Research. 2014. V. 3. No. 1. P. 145–147.
31. Müllenhoff O., Bulgarelli B., Ferraro G., Topouzelis K. The use of ancillary metocean data for the oil spill probability assessment in SAR images // Fresenius Environmental Bull. 2008. V. 17. No. 9b. P. 1383–1390.
32. Sunkur R., Bokhoree C. Application of a GIS based approach to assess the environmental impacts of the MV Wakashio oil spill in the southeast of Mauritius // Intern. J. Engineering Applied Sciences and Technology. 2021. V. 6. No. 4. P. 10–19.
33. Wang Y., Du P., Liu B., Wu X. Geographic information system-based comprehensive oil spill risk assessment in China’s Bohai Sea // Frontiers in Marine Science. 2023. V. 10. Article 1141962. DOI: 10.3389/fmars.2023.1141962.

A GIS approach to satellite oceanology — further development

S. K. Klimenko, A. Yu. Ivanov

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: klimenko.sk@ocean.ru

The paper presents key results of the refinement of a geoinformation (GIS) approach designed to address a range of oceanographic tasks through the analysis of Earth remote sensing data from space. The modernization of the GIS approach involves regular updating of information and integration of additional, relevant digital data on specific marine areas. The improvements are aimed to enhancing the efficiency of detecting and characterizing various phenomena and processes occurring on the sea surface, particularly anthropogenic and natural oil pollution and their sources. In the enhanced version of the GIS approach, pollution sources can be identified almost automatically, provided that comprehensive physical-geographical and industrial information about the marine basin is available. The necessity for continuous refinement of the method is demonstrated by the example of detecting, identifying, and verifying sources of oil pollution amid other phenomena in the Black Sea, using spaceborne optical and radar imagery collected between 2020 and 2024.

Keywords: geographic information system, GIS approach, SAR imagery, oil spills, Black Sea

Accepted: 24.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-288-301

References

1. Zatyagalova V. V., Geoinformational approach for monitoring of pollution of the sea according to remote sensing of the earth from space, *GeoScience*, 2012, No. 2, pp. 80–86 (in Russian).
2. Ivanov A. Yu. Slicks and film formations on space radar images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 73–96 (in Russian).
3. Ivanov A. Yu., Atmospheric front over the Caspian Sea: Analysis using SAR, optical and meteorological data and images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 16–26 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414040071.
4. Ivanov A. Yu., Novaya Zemlya bora and polar cyclones visible from space in radar and optical imagery, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 9–22 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961416040035.
5. Ivanov A. Yu., Mesoscale atmospheric cyclonic vortices over the Black Sea and the Caspian Sea studied using optical and SAR satellite data and images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 1, pp. 12–26 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418010025.
6. Ivanov A. Yu., Zatyagalova V. V., Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 6, pp. 46–63 (in Russian).
7. Ivanov A. Yu., Klimenko S. K., Mariculture in the Black Sea and its impact on the environment according to satellite observations, *Ecology and Industry of Russia*, 2024, V. 28, No. 4, pp. 34–39 (in Russian), DOI: 10.18412/1816-0395-2024-4-34-39.
8. Ivanov A. Yu., Potanin M. Yu., Filimonova N. A., Evtushenko N. V., Antonyuk A. Yu., Operational monitoring of marine areas: new geoinformation solutions and internet technologies, *Zemlya iz kosmosa — naibolee effektivnye resheniya*, 2014, V. 2, No. 18, pp. 28–36 (in Russian).
9. Ivanov A. Yu., Khlebnikov D. V., Kononov B. V. et al., Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 5, pp. 191–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202.
10. Ivanov A. Yu., Matrosova E. R., Kucheiko A. Yu. et al., Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 5, pp. 43–62 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420050061.
11. Kalinichenko V. O., Ilyushina P. G., Uspenskaya E. I., Sergeeva E. S., Sadovnichij R. V., Semenova M. I., Shabalin N. V., Digital solutions for the shelf, *Business J. Neftegaz.RU Offshore*, 2024, No. 7, pp. 14–20 (in Russian).
12. Klimenko S. K., Ivanov A. Yu., Modern distribution and verification of detected natural oil seeps in the Azov–Black Sea basin, *Oceanology*, 2025, V. 65, No. 3, pp. 336–350, DOI: 10.1134/S000143702570002X.

13. Klimenko S. K., Ivanov A. Yu., Terleeva N. V., Oil pollution of the Kerch Strait based on five-year monitoring with SAR: Current status and main sources, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 3, pp. 37–54 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422030071.
14. Kucheiko A. A., Ivanov A. Yu., Klimenko S. K., Observation and operational satellite survey of emergency oil spills and leaks in the coastal zone of the Black Sea, *Ecology and Industry of Russia*, 2022, V. 26, No. 10, pp. 52–59 (in Russian), DOI: 10.18412/1816-0395-2022-10-52-59.
15. 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 RAS, 2011, 480 p. (in Russian).
16. 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 RAS, 2016, 335 p. (in Russian).
17. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody issledovaniya izmenchivosti Kaspiiskogo morya* (Satellite methods in the study of the Caspian Sea variability), Moscow: IKI RAS, 2022, 250 p. (in Russian).
18. Loupian E. A., Matveev A. M., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., The satellite service See the Sea — a tool for the study of oceanic phenomena and processes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 251–261 (in Russian).
19. Novikova A. M., Kashirina E. C., Novikov A. A. et al., GIS in marine research: World experience and possibilities of its application in the Black Sea region, *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T. I. Vyazemskogo — prirodnogo zapovednika RAN*, 2017, No. 1(3), pp. 54–66 (in Russian), DOI: 10.21072/eco.2021.03.05.
20. The consequences of the technogenic ecological disaster in the Black Sea will be felt throughout 2025 — expert analysis of satellite images, <https://www.scanex.ru/>, 25.12.2024 (in Russian), <https://www.scanex.ru/company/news/posledstviya-tekhnogennoy-ekologicheskoy-katastrofy-v-chernom-more-budut-oshchutimy-na-protyazhenii-/>.
21. Radar imaging shows technogenic fuel oil spills continuing in the Black Sea, <https://www.scanex.ru/>, 13.01.2025 (in Russian), <https://www.scanex.ru/company/news/rli-pokazyvayut-cto-v-chernom-more-prodolzhayutsya-tekhnogennye-razlivy-mazuta-/>.
22. Chandra A. M., Gosh S. K., *Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* (Remote sensing and geographic information systems), Moscow: Tekhnosfera, 2008, 312 p. (in Russian).
23. Abdunaser K., Oil pollution monitoring and detection using GIS and remote sensing techniques: A case study from Libya, In: *Environmental Applications of Remote Sensing and GIS in Libya*, Springer, Cham, 2022, pp. 227–243.
24. Akinwumiju A. S., Adelodun A. A., Ogundeji S. E., Geospatial assessment of oil spill pollution in the Niger delta of Nigeria: An evidence-based evaluation of causes and potential remedies, *Environmental Pollution*, 2020, V. 267, Article 115545, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115545.
25. Aukett L., The use of geographical information systems (GIS) in oil spill preparedness and response, *Intern. Conf. "Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production"*, Australia, 2012, Article SPE-157384-MS, DOI: 10.2118/157384-MS.
26. Bing L., Xing Q.-G., Liu X., Zou N.-N., Spatial distribution characteristics of oil spills in the Bohai Sea based on satellite remote sensing and GIS, *J. Coastal Research*, 2019, V. 90, Iss. SI, pp. 164–170.
27. DeMers M. N., *Fundamentals of Geographic Information Systems*, 4th ed., USA: John Wiley and Sons, 2009, 443 p.
28. Khlebnikov D. V., Ivanov A. Yu., Evdoshenko M. A., Klimenko S. K., Manifestations of upwellings in the Black Sea in multisensor remote sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, pp. 1435–1449, DOI: 10.1134/S0001433823120137.
29. Lau T. K., Huang K. H., A timely and accurate approach to nearshore oil spill monitoring using deep learning and GIS, *Science of the Total Environment*, 2024, V. 912, Article 169500, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169500.
30. Mehta S. P., GIS application in oceanography, *Intern. J. Scientific Research*, 2014, V. 3, No. 1, pp. 145–147.
31. Müllenhoff O., Bulgarelli B., Ferraro G., Topouzelis K., The use of ancillary metocean data for the oil spill probability assessment in SAR images, *Fresenius Environmental Bull.*, 2008, V. 17, No. 9b, pp. 1383–1390.
32. Sunkur R., Bokhoree C., Application of a GIS based approach to assess the environmental impacts of the MV Wakashio oil spill in the southeast of Mauritius, *Intern. J. Engineering Applied Sciences and Technology*, 2021, V. 6, No. 4, pp. 10–19.
33. Wang Y., Du P., Liu B., Wu X., Geographic information system-based comprehensive oil spill risk assessment in China's Bohai Sea, *Frontiers in Marine Science*, 2023, V. 10, Article 1141962, DOI: 10.3389/fmars.2023.1141962.