

Л.А. Балакай , Т.В. Дедова ,
Н.З. Баширова , А.А. Мерекеев* 

ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан
*e-mail: aibek.merekeyev@ionos.kz

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЯНЫХ РАЗЛИВОВ В КАЗАХСТАНСКОМ СЕКТОРЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Разработана комплексная методика космического мониторинга нефтяных загрязнений в казахстанском секторе Каспийского моря, объединяющая автоматизированную обработку радиолокационных снимков Sentinel-1, методы глубокого обучения и гидродинамическое моделирование. Основная цель – достоверное выявление нефтяных slickов, их дифференциация от природных явлений типа look-alike и прогнозирование распространения по акватории моря. С помощью данной методики обработано 2326 сцен за период с августа 2023 г. по август 2025 г. Семантическая сегментация выполнена с использованием трансформерной архитектуры Mask2Former, обученной на специализированном датасете радиолокационных изображений Каспийского моря. Для прогнозирования динамики загрязнений применена модель Oil Spill MIKE 21 с учётом метеорологических данных GFS и батиметрии, созданной на основе данных GEBCO. Выявлено 52 нефтяных slickа общей площадью около 269 км² преимущественно в районах интенсивного судоходства и портовой инфраструктуры. Детальный анализ крупного slickа от 16.08.2025 с привлечением разновременных спутниковых данных Sentinel-1A и Sentinel-2, а также гидродинамического моделирования, показал, что его характеристики соответствуют сбросу нефтесодержащих (ляльных) вод, а не аварийному разливу сырой нефти. Разработанная методика обеспечивает переход от обнаружения загрязнений к научно обоснованному прогнозу их поведения. Перспективы развития связаны с интеграцией данных автоматической идентификационной системы для идентификации судов-нарушителей и создания системы оперативного экологического контроля.

Ключевые слова: Каспийское море, нефтяное загрязнение, космический мониторинг, методы глубокого обучения, математическое моделирование.

L.A. Balakay, T.V. Dedova, N.Z. Bashirova, A.A. Merekeyev*

LLP «Institute of Ionosphere», Almaty, Kazakhstan

*e-mail: aibek.merekeyev@ionos.kz

Satellite monitoring of oil spills in the kazakh sector of the Caspian sea: results and interpretation

A comprehensive methodology for space-based monitoring of oil pollution in the Kazakh sector of the Caspian Sea has been developed. The approach integrates automated processing of Sentinel-1 SAR imagery, deep learning techniques, and hydrodynamic modeling. The primary objective is the reliable detection of oil slicks, their differentiation from natural look-alike phenomena, and forecasting their dispersion across the marine area. Using this methodology, 2,326 satellite scenes acquired between August 2023 and August 2025 were processed. Semantic segmentation was performed using the Mask-2Former transformer architecture trained on a specialized SAR dataset of the Caspian Sea. To forecast pollution dynamics, the MIKE 21 Oil Spill model was applied, incorporating GFS meteorological data and bathymetry derived from GEBCO. A total of 52 oil slicks with a combined area of approximately 269 km² were identified, predominantly in regions of intensive shipping and port infrastructure. A detailed analysis of a major slick detected on 16 August 2025, based on multi-temporal Sentinel-1A and Sentinel-2 data as well as hydrodynamic modeling, demonstrated that its characteristics correspond to the discharge of oily (bilge) water rather than an accidental crude oil spill. The developed methodology enables a transition from pollution detection to scientifically grounded forecasting of slick behavior. Future developments include the integration of Automatic Identification System data to identify violating vessels and to establish an operational environmental monitoring system.

Keywords: Caspian Sea, oil pollution, remote sensing, deep learning methods, mathematical modeling.

Л.А. Балакай, Т.В. Дедова, Н.З. Баширова, А.А. Мерекеев*

«Институт ионосферы» ЖШС, Алматы, Қазақстан

*e-mail: aibek.merekeyev@ionos.kz

Қазақстандық Каспий теңізі секторындағы мұнай төгінділерін ғарыштық мониторингтеу: нәтижелері мен түсіндірмесі

Қазақстандық Каспий теңізі секторында мұнаймен ластануды ғарыштық мониторингтеудің кешенді әдістемесі әзірленді. Әдістеме Sentinel-1 радиолокациялық суреттерін автоматтандырылған өңдеуді, терең оқыту әдістерін және гидродинамикалық модельдеуді біріктіреді. Негізгі мақсат – мұнай дақтарын сенімді анықтау, оларды табиғи «look-alike» құбылыстарынан ажырату және теңіз акваториясында таралуын болжау. Осы әдістеме арқылы 2023 жылғы тамыздан 2025 жылғы тамызға дейінгі кезеңде 2326 спутниктік көрініс өңделді. Семантикалық сегментация Каспий теңізінің радиолокациялық кескіндерінің арнайы деректер жиынтығында оқытылған Mask2Former трансформерлік архитектурасы негізінде орындалды. Ластанулардың динамикасын болжау үшін GFS метеорологиялық деректері мен GEBCO негізінде жасалған батиметрияны ескере отырып, MIKE 21 Oil Spill моделі қолданылды. Қарқынды кеме қатынасы және порт инфрақұрылымы аймақтарында жалпы ауданы шамамен 269 км² болатын 52 мұнай дағы анықталды. 16.08.2025 ж. тіркелген ірі мұнай дағын Sentinel-1A және Sentinel-2 спутниктік деректерін, сондай-ақ гидродинамикалық модельдеуді пайдалана отырып жүргізілген егжей-тегжейлі талдау оның сипаттамалары шикі мұнайдың апаттық төгілуіне емес, мұнайқұрамды (льяльды) сулардың төгілуіне сәйкес келетінін көрсетті. Әзірленген әдістеме ластануларды анықтаудан олардың мінез-құлқын ғылыми негізделген болжауға көшуге мүмкіндік береді. Әдістемені одан әрі дамыту автоматты сәйкестендіру жүйесінің деректерін интеграциялау арқылы құқық бұзушы кемелерді анықтау және жедел экологиялық бақылау жүйесін құрумен байланысты.

Түйін сөздер: Каспий теңізі, мұнай ластануы, ғарыштық мониторинг, терең оқыту әдістері, математикалық модельдеу.

Введение

Каспийское море является экологически чувствительным регионом с уникальными природными сообществами, включая эндемичные виды и сложные экосистемы прибрежных и морских зон, что делает его объектом интенсивных научных исследований (Court et al., 2025; Булавина & Герасимов, 2025). Одновременно Каспий остаётся центром масштабной добычи и транспортировки нефти и нефтепродуктов, что создаёт устойчивое антропогенное давление на окружающую среду и повышает риск загрязнения морской поверхности углеводородами. Сочетание высокой природной ценности и промышленной нагрузки определяет необходимость развития эффективных методов оперативного экологического мониторинга, ориентированных как на выявление загрязнений, так и на анализ их пространственно-временной динамики.

В последние годы в качестве основного инструмента решения данной задачи широко применяются данные дистанционного зондирования Земли, позволяющие осуществлять регулярные наблюдения за акваторией, фиксировать нефтяные плёнки и оценивать особенности их распределения во времени и пространстве (Nurtas et al., 2025). Использование спутниковых наблюдений обеспечивает охват труднодоступных районов,

сопоставимость результатов и возможность ретроспективного анализа.

Ключевую роль при мониторинге нефтяных загрязнений играют радиолокационные данные, поскольку они обеспечивают всепогодное и круглосуточное наблюдение морской поверхности и позволяют уверенно регистрировать зоны пониженного обратного рассеяния, обусловленные наличием поверхностных плёнок (Hu et al., 2021). Радиолокационные сенсоры чувствительны к изменениям микрошероховатости водной поверхности, что делает их наиболее эффективным инструментом обнаружения нефтяных slickов независимо от облачности и освещённости.

Оптические спутниковые данные используются в качестве дополнительного источника информации и позволяют уточнять природу выявленных аномалий, анализировать морфологию загрязнений, оценивать цветовые и текстурные характеристики водной поверхности, а также отслеживать трансформацию пятен во времени. Совместное использование радиолокационных и оптических наблюдений повышает достоверность интерпретации и расширяет аналитические возможности космического мониторинга (Mityagina & Kostianoy, 2025).

Наряду с развитием средств космического наблюдения, современный мониторинг нефтя-

ных загрязнений опирается на методы глубокой машинной обработки данных. Архитектуры глубокого обучения, такие как DeepLabv3+ и Mask2Former, демонстрируют высокую эффективность в задачах семантической сегментации спутниковых изображений и позволяют выделять нефтяные плёнки и сопутствующие классы (вода, суша, look-alike) с высоким уровнем точности (Балакай et al., 2024). Появление специализированных датасетов для детекции нефтяных пятен (в том числе маскированных областей, look-alike феноменов и т. п.) существенно расширяет возможности обучения и валидации моделей глубокого обучения и служит опорой для сравнительных исследований в области дистанционного мониторинга загрязнений (Krestenitis et al., 2019).

Кроме задач обнаружения, важной составляющей комплексного мониторинга является прогнозное моделирование перемещения нефтяных загрязнений в морской среде. Для этого используются различные гидродинамические и лагранжевые модели (Keramea et al., 2021), которые описывают дрейф, диффузию и другие процессы, влияющие на пространственно-временное распределение нефтяных частиц – это позволяет оценить динамику распространения загрязнения и потенциал его воздействия на прибрежные экосистемы.

До недавнего времени задачи обнаружения и прогноза нефтяного загрязнения морской поверхности решались преимущественно раздельно: исследования фокусировались либо на детекции разливов по спутниковым данным, либо на моделировании гипотетических сценариев аварий. В настоящей работе впервые для Каспийского моря предложена и апробирована автоматизированная система, объединяющая эти этапы в единый сквозной цикл. Система последовательно выполняет загрузку и обработку радиолокационных снимков Sentinel-1, семантическую сегментацию нефтяных плёнок с использованием архитектуры Mask2Former и гидродинамическое моделирование переноса загрязнения в среде Oil Spill MIKE 21. Такая интеграция позволяет не только обнаруживать слики, но и оценивать динамику их перемещения в акватории Каспийского моря. Дополнительный детальный анализ крупного слика, расположенного на трассе судоходства Курык–Баку, выполненный с использованием разновременных космических снимков и результатов численного моделирования его переноса, позволяет сделать обоснованное заключение о вероятном составе

дешифрованного по данным ДЗЗ загрязнения и демонстрирует перспективность интеграции систем дистанционного мониторинга с сервисами отслеживания судов для установления возможного источника загрязнения.

Материалы и методы

В данной работе мониторинг нефтяного загрязнения проводился с использованием радиолокационных снимков спутников Sentinel-1, входящих в европейскую программу наблюдения Земли Copernicus Programme (*Sentinel-1. Radar Vision for Copernicus*, 2025), оснащённых С-диапазонным синтезированным апертурным радиолокатором (SAR). Научная методология была направлена на разграничение нефтяных сликов и природных явлений типа «look-alike», имеющих сходный радиометрический отклик на снимках. К таким явлениям относятся зоны штиля, внутренние волны, апвеллинг, дождевые ячейки, биогенные плёнки и др. Основной исследовательский вопрос состоял в том, как обеспечить автоматизированное и достоверное выявление нефтяных загрязнений и их дифференциацию от природных феноменов с формированием пространственно-распределённых слоёв, пригодных для последующего анализа и прогнозирования распространения нефти и нефтесодержащих продуктов по морской акватории.

Этапы проведенного исследования иллюстрирует Рисунок 1. Из схемы видно, что на первом этапе осуществлялась автоматическая загрузка продуктов Sentinel-1A и Sentinel-1C уровня Level-1 GRD в формате SAFE/COG через платформу Copernicus Data Space Ecosystem (*Catalog APIs. Copernicus*, 2025) с использованием API доступа. Данные проходили контроль целостности, распаковку, систематизацию и каталогизацию.

Далее проводился предварительный анализ, в ходе которого эксперт в ПО ArcGIS Pro оценивал снимок на предмет выявления зон выглаживания морской поверхности. Определялись участки с пониженным уровнем обратного рассеяния, соответствующие сглаженным зонам. При этом учитывались гидрометеорологические условия съёмки, такие как скорость ветра и наличие осадков, которые могут влиять на интерпретацию радиолокационного сигнала. По результатам анализа выполнялось кадрирование снимка в пределах выявленных зон, включая все сомнительные области, как потенциальные нефтяные слики, так и look-alike.

Рисунок 1

Этапы автоматизированного распознавания и моделирования нефтяного загрязнения Каспийского моря



Примечание: рисунок составлен авторами

На следующем этапе средствами Python осуществлялось фрагментирование кадрированного снимка и его последующая автоматическая классификация с выделением следующих классов: нефтяной разлив, морская поверхность, суша, суда, look-alike и области без данных (NODATA). Детектирование выполнялось методом семантической сегментации на основе трансформерной

архитектуры Mask2Former (Cheng et al., 2021; Mask2Former, 2025), обеспечивающей извлечение многомасштабных пространственных признаков и учёт глобального контекста сцены. Такой подход позволяет корректно выделять нефтяные плёнки сложной формы, устойчиво различать их с радиометрически сходными природными образованиями и снижать количество

ложных срабатываний за счёт использования контекстной информации всей сцены.

Распознавание выполнялось с привлечением специализированного обучающего датасета радиолокационных изображений с пиксельной разметкой тематических классов, описанного в ранее опубликованной работе авторов (Балакай et al., 2024). Использование данного датасета обеспечило обучение модели на репрезентативной выборке реальных радиолокационных сцен Каспийского моря и повысило устойчивость распознавания к вариациям текстуры морской поверхности и условиям съёмки.

Анализ использования модели Mask2Former для семантической сегментации радиолокационных изображений показал высокую точность распознавания базовых классов подстилающей поверхности – водной поверхности, суши и фоновых областей, для которых значения IoU, Ассигасу, полноты и F-меры на тестовой и валидационной выборках достигают 97–99 %. Для класса нефтяных плёнок значения метрик находятся на умеренном уровне (IoU около 49–56 %, F-мера 58–72 %), что отражает сложность их радиолокационного проявления и спектрально-текстурное сходство с природными явлениями типа look-alike. Сопоставимые по величине показатели получены и для класса look-alike. Наименьшие значения метрик соответствуют классу судов на валидационной выборке, что, вероятно, связано с ограниченным объёмом обучающих данных для данного типа объектов. В целом результаты свидетельствуют о высокой надёжности выделения фоновых классов и подтверждают более сложный характер автоматического распознавания нефтяных загрязнений.

На этапе постобработки выполнялось объединение классифицированных фрагментов в единый тематический слой с восстановлением географической привязки, после чего проводилась экспертная верификация, включавшая оценку корректности распознавания нефтяных сликов, анализ спорных участков класса look-alike и принятие решения о целесообразности дальнейшего прогноза. По результатам верификации осуществлялась дискретизация слика и преобразование данных сегментации в растровый слой с расчётом параметров ячеек, характеризующих интенсивность загрязнения, который использовался в качестве пространственно-распределённого источника при последующем моделировании его распространения. При этом

поверхностная плёнка рассматривалась как начальная форма существования загрязняющего вещества в морской среде, где оно далее претерпевает комплекс взаимосвязанных физико-химических и биологических преобразований и может переходить в эмульгированное, растворённое и взвешенное состояние. Численное воспроизведение этих процессов осуществлялось с применением модели Oil Spill MIKE 21 (*DHI OIL Spill Model. Oil Spill Template. Scientific Description. MIKE Powered by DHI*, 2024), разработанной Датским гидравлическим институтом DHI, в которой перенос и трансформация загрязнения описываются лагранжевым методом дискретных частиц с учётом растекания, испарения, эмульгирования, растворения, окисления, биodeградации и седиментации. Поскольку определяющим фактором пространственного перемещения нефтяной плёнки является поле течений, на подготовительном этапе выполнялась загрузка прогнозных метеорологических данных Global Forecast System (GFS) из базы Национального центра экологического прогнозирования (NCEP) (*Global Forecast System (GFS)*, 2025), после чего в гидродинамическом модуле MIKE 21 Hydrodynamic (HD) (*MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation*, 2025) рассчитывались циркуляция вод и структура потоков с учётом батиметрии, ветрового воздействия, колебаний уровня моря, донного и поверхностного трения. В качестве источника батиметрических данных использовался глобальный массив GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*, 2025). Полученное гидродинамическое поле служило основой для последующего прогноза перемещения нефтяного слика по морской поверхности. Результаты моделирования представлялись в виде картографических и цифровых выходных данных, что обеспечивало физически обоснованную оценку динамики распространения нефтяного загрязнения в акватории Каспийского моря.

Таким образом, предложенная технологическая схема объединяет данные дистанционного зондирования, методы глубокого обучения и гидродинамическое моделирование, позволяя перейти от обнаружения нефтяного слика к прогнозу его дальнейшего распространения. Это повышает оперативность и практическую ценность космического мониторинга для решения задач экологической безопасности морской акватории.

Результаты

На основе описанной методики был осуществлён анализ 2326 сцен Sentinel-1, охватывающих период с 1 августа 2023 г. по 31 августа 2025 г., с пространственным охватом казахстанского сектора Каспийского моря. Были дешифрованы 52 случая выглаживания морской поверхности, интерпретированные как нефтяные плёнки, общей площадью около 269 км². Рисунок 2 демонстрирует некоторые результаты распознавания нефтяного загрязнения с использованием модели Mask2Former.

На рисунке слева приведены фрагменты радиолокационных снимков, а справа – результаты дешифрирования, на которых красным цветом показана распознанные нефтяные пленки, голубым – вода, зеленым – земля, серым – look-alike, а светло-голубым – NODATA. Как видно из рисунка, Mask2Former достаточно точно классифицирует нефтяные пленки, небольшие погрешности возникают при классификации суши.

Рисунок 3 иллюстрирует месячную динамику изменения площади нефтяных снимков, дешифрованных по данным Sentinel-1. Диаграмма показывает, что в ряде месяцев (особенно зимой) нефтяные плёнки не фиксировались, что связано с ледовыми условиями в северной части моря и особенностями ветрового режима в Среднем и Южном Каспии. Распределение площадей нефтяного загрязнения по месяцам имело неравномерный характер.

Распределение площадей отдельных снимков крайне неравномерно. Более половины выявленных случаев имеют площадь менее 1 км² (30 случаев из 52, 58%). Значительно реже фиксируются снимки площадью от 1 до 5 км² (12 случаев, 23%), а крупные от 5 до 10 км² еще реже (8 случаев, 15%). И лишь два эпизода превышают площадь 10 км². Эти крупные выглаживания морской поверхности датируются 16.04.2024 г и 16.08.2025 и имеют площадь 71,89 км² 106,58 км² соответственно. На них в совокупности приходится около 66% всей выявленной площади загрязнения.

Более детальный статистический анализ по годам показывает, что:

- Во второй половине 2023 г. было зафиксировано 7 снимков суммарной площадью 12,14 км²;

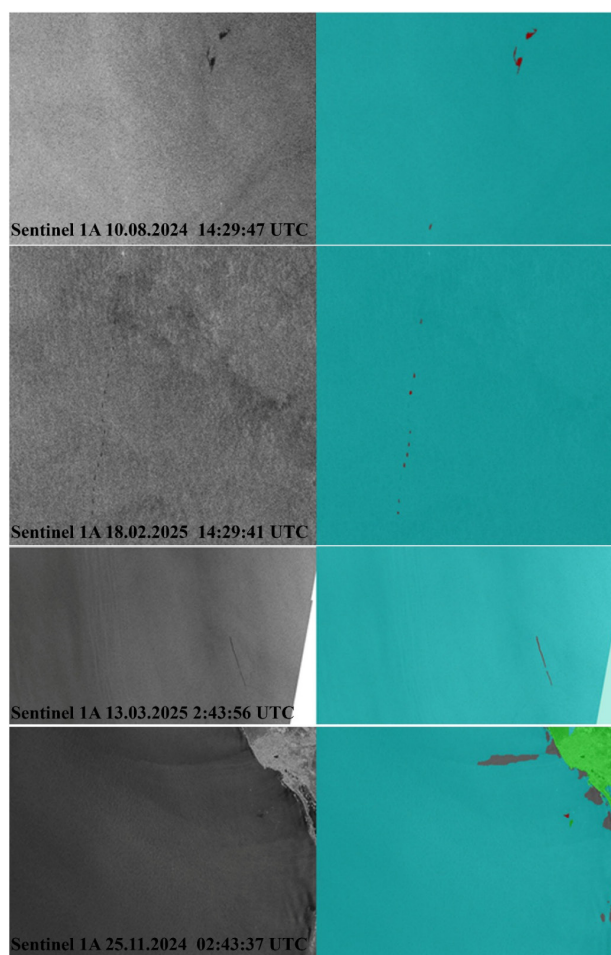
средняя площадь составила 1,73 км², медианная – 1,31 км², диапазон – от 0,24 до 5,22 км².

- В 2024 г. зарегистрировано 33 снимка общей площадью 113,7 км²; средняя площадь – 3,45 км², медианная – 0,76 км², минимальный снимок – 0,034 км², максимальный – 71,89 км².

- В первой половине 2025 г. зафиксировано 12 снимков общей площадью 142,8 км²; средняя площадь составила 11,9 км², медианная – 0,84 км², диапазон – от 0,20 до 106,58 км².

Рисунок 2

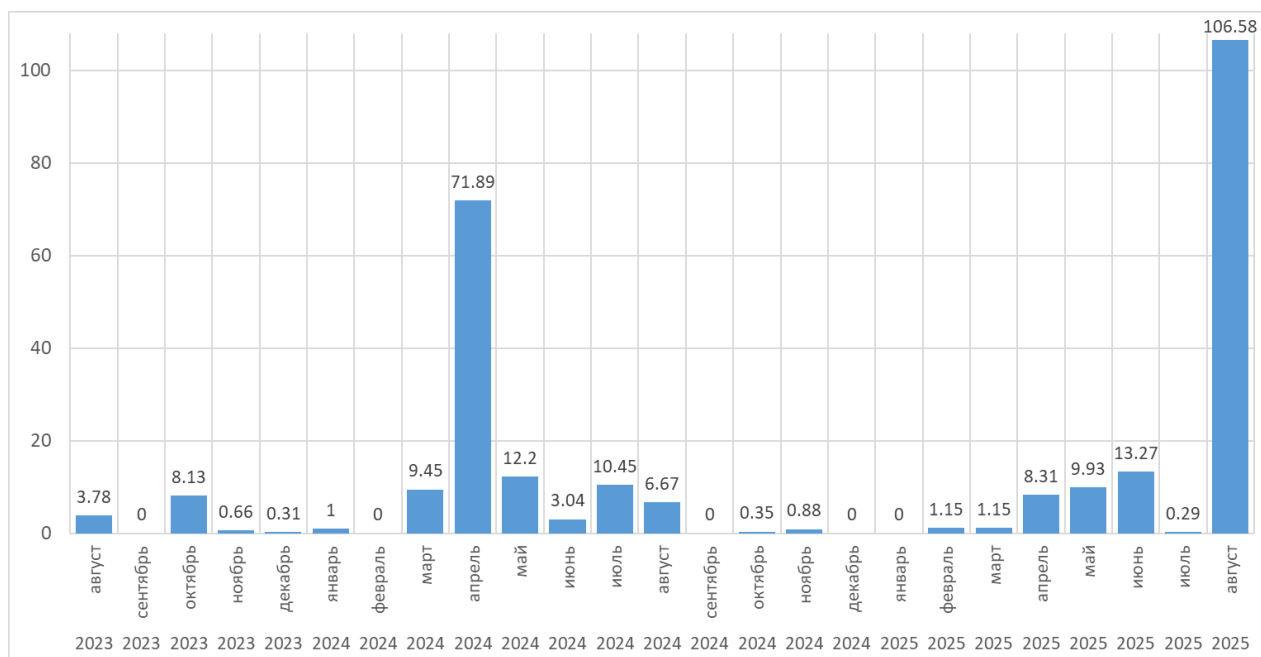
Фрагменты радиолокационных снимков Sentinel-1A (слева) с нефтяными снимками и соответствующие результаты дешифрирования (справа) тематического дешифрирования (красный цвет – нефть, голубой – вода, зеленый – земля, серый – look-alike, светло-голубой – NODATA)



Примечание: рисунок составлен авторами

Рисунок 3

Месячная динамика площади нефтяных slickов по данным спутников Sentinel-1 за 2023–2025 гг.



Примечание: рисунок составлен авторами

Пространственный анализ показал приуроченность большинства slickов к районам интенсивного судоходства и портовой инфраструктуры, а также их повторяемость в одних и тех же местах, что указывает на антропогенный характер загрязнений. Данный вывод подтверждается характерной вытянутой формой slickов (см. Рисунок 4). Основными источниками таких загрязнений являются воды судов, которые могут быть трюмными, балластными или льяльными. Дополнительно нефтяные загрязнения могут возникать при протечках топливных баков, промывке машинных отделений, погрузке и разгрузке нефтепродуктов, а также при аварийных разливах.

Интегральная карта загрязнения акватории казахстанского сектора Каспийского моря нефтяными пленками за период с 1.08.2023 по 31.07.2025 приведена на Рисунок 5. Из рисунка видно, что зафиксированные нефтяные слики в казахстанском секторе Каспийского моря имеют четко выраженную простран-

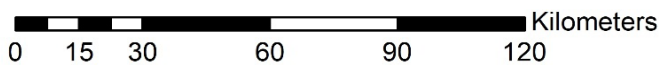
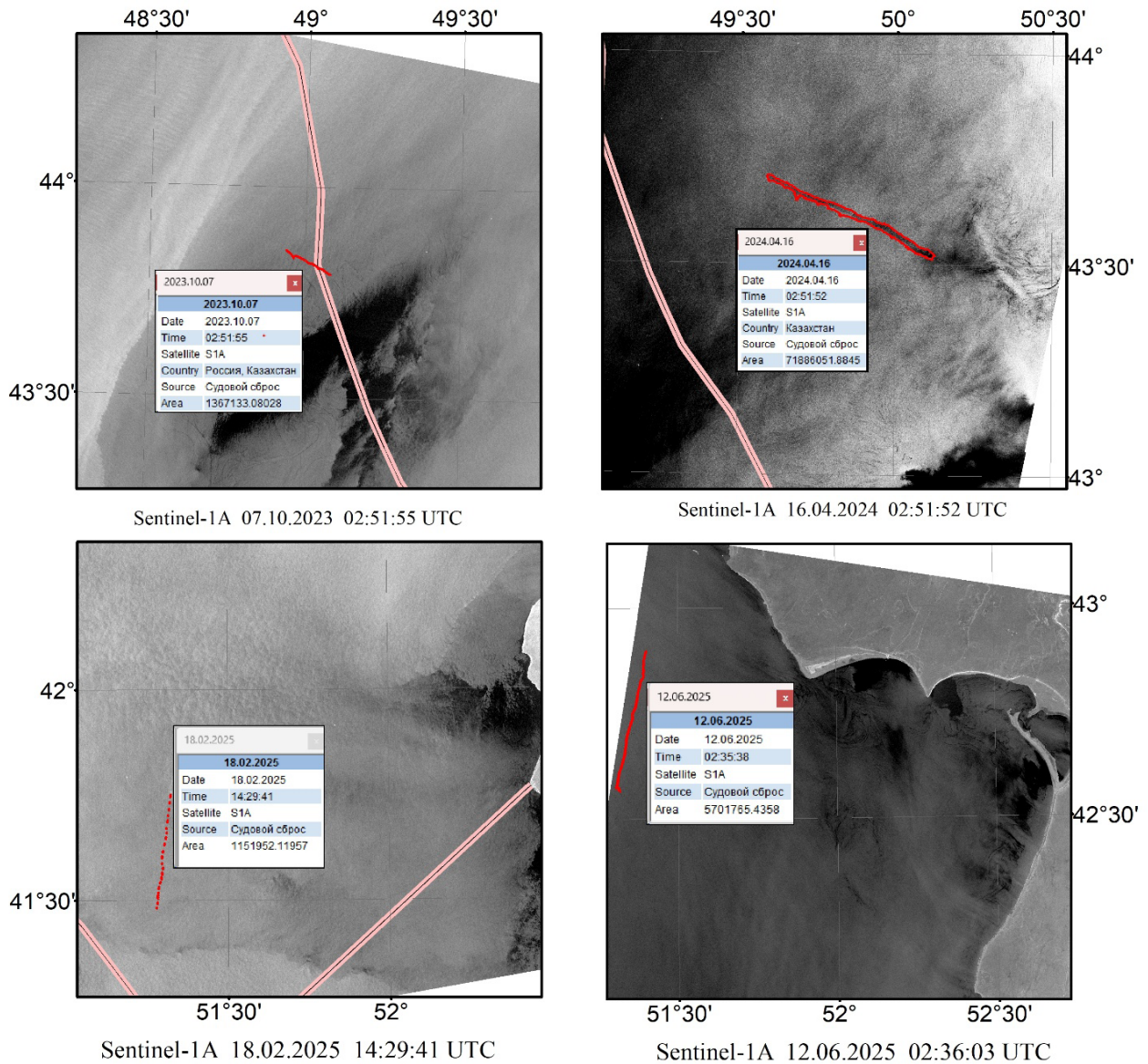
ственную приуроченность. Большая их часть локализуется в центральной и южной частях акватории, преимущественно вдоль основных судоходных маршрутов, ведущих к портам Актау и Курык. Конфигурация и протяженность пятен свидетельствуют об их антропогенном происхождении.

Интегральная карта нефтяного загрязнения акватории казахстанского сектора Каспийского моря, построенная по данным Sentinel-1A за период с 1.08.2023 по 31.08.2025

Наличие повторяющихся slickов вблизи портовой инфраструктуры и маршрутов движения судов указывает на устойчивый характер загрязнений, связанных с эксплуатационной деятельностью морского транспорта. При этом в северной части казахстанского сектора Каспия нефтяные загрязнения практически не фиксировались, что подчеркивает географическую избирательность источников и необходимость усиленного экологического контроля именно в районах интенсивного судоходства.

Рисунок 4

Примеры нефтяных slick от судовых сбросов на снимках Sentinel-1A в разные даты

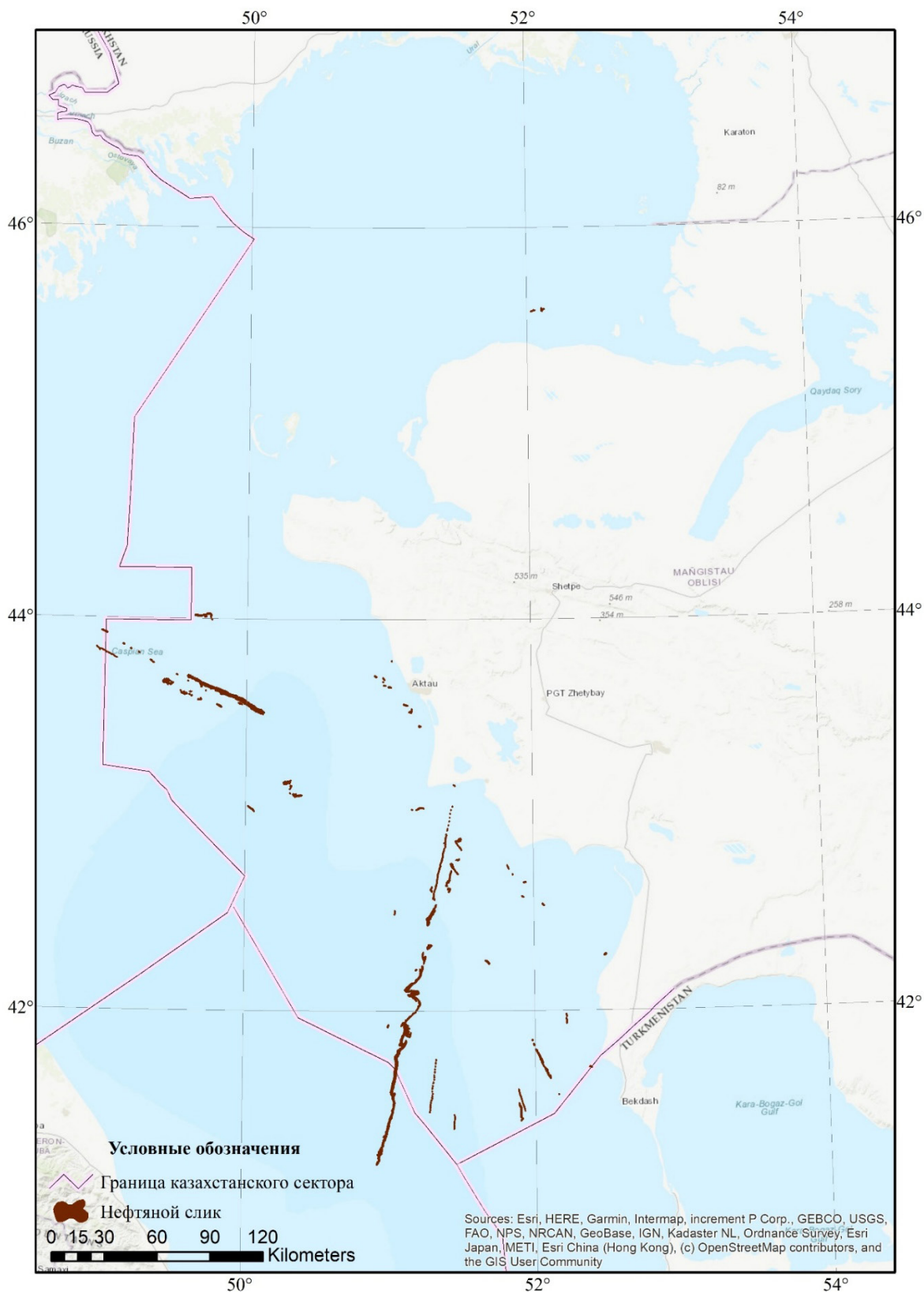


Условные обозначения

- Граница казахстанского сектора Каспийского моря
- Нефтяной slick

Примечание: рисунок составлен авторами

Рисунок 5



Примечание: рисунок составлен авторами

Обсуждения

Ложноположительные случаи распознавания нефтяного загрязнения

На радиолокационных снимках акватории Каспийского моря нередко фиксируются зоны выглаживания поверхности воды, которые по своим радиофизическим характеристикам могут быть интерпретированы как нефтяные загрязнения. Подобные участки, однако, не всегда связаны с фактическим наличием нефти и относятся к категории ложноположительных распознаваний. В данном разделе рассматриваются отдельные случаи такого рода с целью сопоставления результатов автоматизированного дешифрирования радиолокационных данных, проведенного в рамках настоящего исследования, а также выявления причин расхождений и факторов, способствующих формированию ложноположительных интерпретаций.

На радиолокационном снимке от 29 июля 2024 г. наблюдается участок выглаженной поверхности моря, имеющих небольшую площадь. Его отнесение к нефтяным пленкам представляется сомнительным, поскольку в непосредственной близости фиксируются аналогичные линейные структуры сглаживания, характерные для биогенных пленок (см. Рисунок 6 А). Вероятнее всего данный слик является биогенной пленкой.

Акватория Каспийского моря на радиолокационном снимке Sentinel-1A от 31.12.2024 02:43:59 UTC (см. Рисунок 6 Б) характеризуется выраженной неоднородной структурой обратного рассеяния. Это свидетельствует о том, что скорость ветра над морской поверхностью находилась в пределах 0–3 м/с. Это подтверждается метеорологическими наблюдениями на метеостанции Aktau (airport), METAR, где в период с 00:00 UTC по 09:00 UTC фиксировалась скорость ветра 2–3 м/с.

Известно, что устойчивое проявление нефтяных пленок на радиолокационных изображениях возможно только в ограниченном диапазоне скоростей ветра – примерно от 2 до 8 м/с (Alpers et al., 2017). При меньших значениях скорости ветра выделение антропогенных пленок затруд-

нено. При скоростях выше 8–10 м/с нефтяные пленки быстро разрушаются и становятся невидимыми для радиолокатора.

Отдельный интерес представляют случаи, требующие повышенного внимания и, в ряде ситуаций, проведения натурного подтверждения. На радиолокационном снимке за 7 апреля 2025 г. (см. Рисунок 6 В) фиксируются многочисленные слики малого размера. Их интерпретация неоднозначна: подобные структуры могут указывать как на естественные процессы просачивания углеводородов с морского дна, так и на явления иного генезиса, например, выносы илового материала. Следует отметить, что такие сомнительные слики приурочены преимущественно к мелководной северной части Каспийского моря. В условиях прогрессирующего обмеления акватории здесь усиливаются донные процессы, что способствует более частому подъёму взвеси.

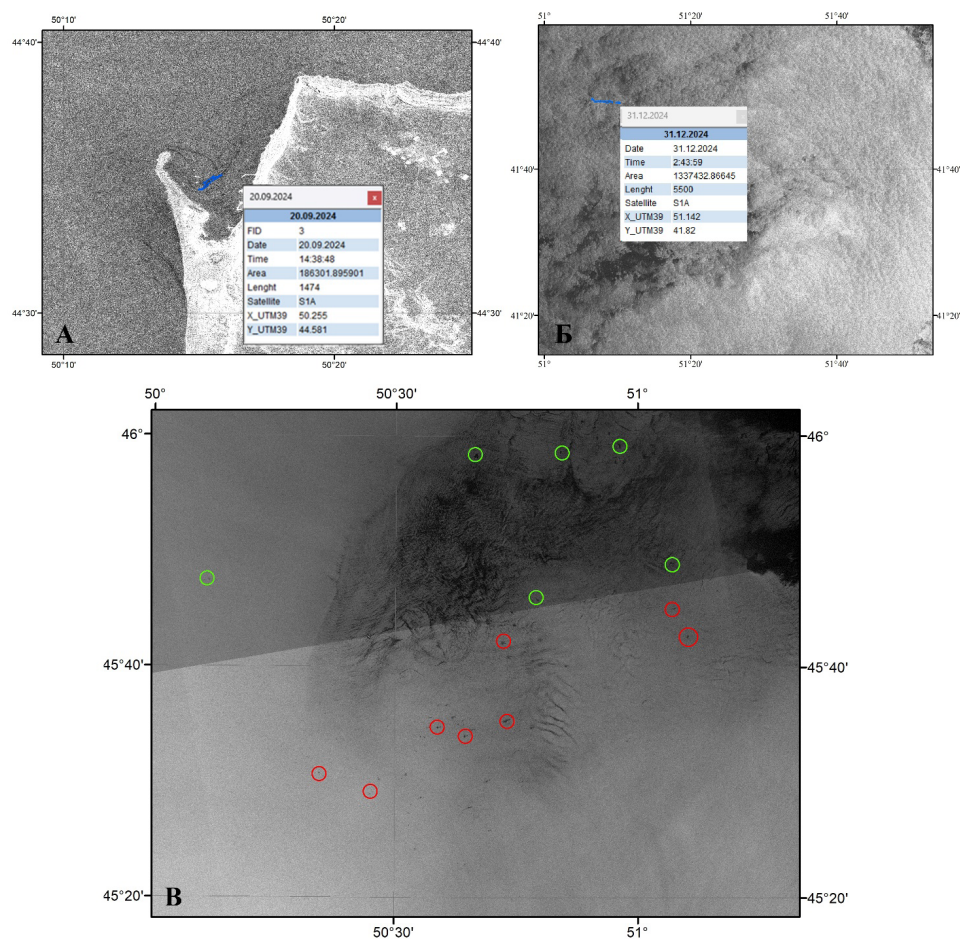
Так, на оптическом снимке Sentinel-2 (Рисунок 7 А), на котором чётко идентифицируется остров Д месторождения Кашаган, наблюдаются затемненные области, формирующиеся при движении катеров, вызывающих подъем ила со дна и его перенос в толще воды. Подобные проявления представляют собой один из типичных источников ложноположительных сигналов на радиолокационных спутниковых данных (Рисунок 7 Б), поскольку они могут приводить к выглаживанию морской поверхности, а следовательно, передаваться на радиолокационном снимке зоной черного цвета. Это подтверждает необходимость комплексного анализа, включающего как данные различных спутниковых сенсоров (радарных и оптических), так и натурные наблюдения, для более надежной идентификации природы выявленных аномалий.

Детальный анализ нефтяного слика, обнаруженного на Sentinel-1A 16.08.2025

Для детального анализа природы одного из наиболее протяженных сликов был рассмотрен случай, зафиксированный на радиолокационном снимке Sentinel-1A за 16.08.2025 02:43:53 UTC (см. Рисунок 8, А).

Рисунок 6

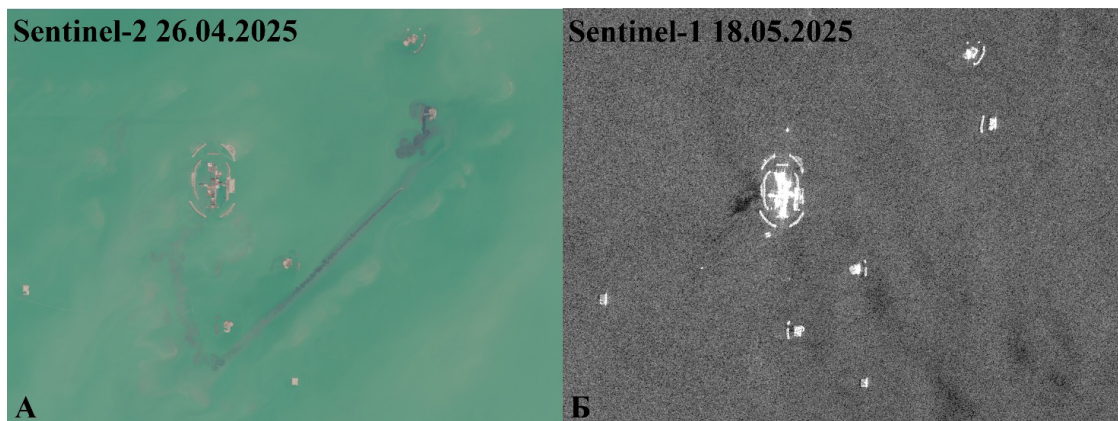
Радиолокационные снимки Sentinel-1A, А – 29.07.2024 14:30:36 UTC, Б – 31.12.2024 2:43:59 UTC, В – 07.04.2025 14:30:31 UTC и 14:30:56 UTC



Примечание: рисунок составлен авторами

Рисунок 7

Снимки месторождения Кашаган



Примечание: рисунок составлен авторами

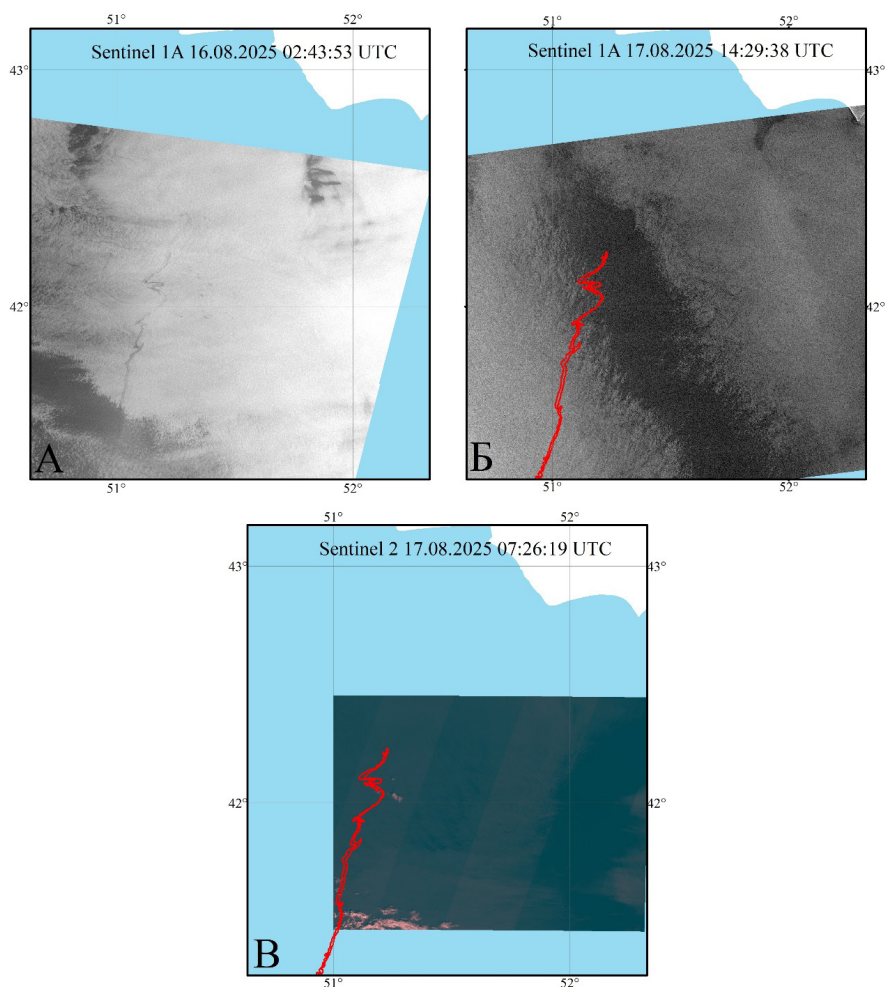
Протяженность данного слика составила около 125 км, площадь – 106,58 км². Ветровые условия в момент съёмки характеризовались скоростями 3–6 м/с, что соответствует диапазону, благоприятному для радиолокационного обнаружения поверхностных плёнок. На более поздних снимках за 17.08.2025 – радиолокационном Sentinel-1A (Рисунок 8, Б) и оптическом Sentinel-2 (Рисунок 8, В) – признаки нефтяного загрязнения не зафиксированы, что указывает на быстрое разрушение плёнки. В сочетании с большой площадью, неоднородной текстурой и морфологией слика это позволяет с высокой вероятностью интерпретировать его как след от сброса судном вод с низкой концентрацией нефтепродуктов, которые

быстро диспергировались и эмульгировались под воздействием ветра и волнения.

Косвенной оценкой характера загрязнения служит расчёт возможной массы нефтепродуктов, попавших в морскую среду. Для разлива сырой нефти с толщиной плёнки от 0,2 до 1 мм и зафиксированной площадью загрязнения масса нефти могла бы достигать 19 200–95 900 т, что соответствует аварийному событию катастрофического масштаба. Такое загрязнение не способно самостоятельно исчезнуть с поверхности моря и было бы обнаружено на спутниковых снимках на следующий день. Для тонких плёнок, образованных льяльными или балластными водами судов, при толщине 0,04–0,3 мкм расчётная масса составляет 3–27 т, что согласуется с эксплуатационными сбросами.

Рисунок 8

Снимок Sentinel-1A за 16.08.2025 02:43:53 UTC



Примечание: рисунок составлен авторами

Моделирование растекания обнаруженного слика демонстрирует Рисунок 9. На нем светло-коричневым полигоном показано положение дешифрированного нефтяного слика на момент его обнаружения, тогда как поле, представленное палитрой жёлто-коричневых оттенков, отражает распределение массы загрязняющего вещества по результатам расчёта в OS MIKE 21 через 120 часов.

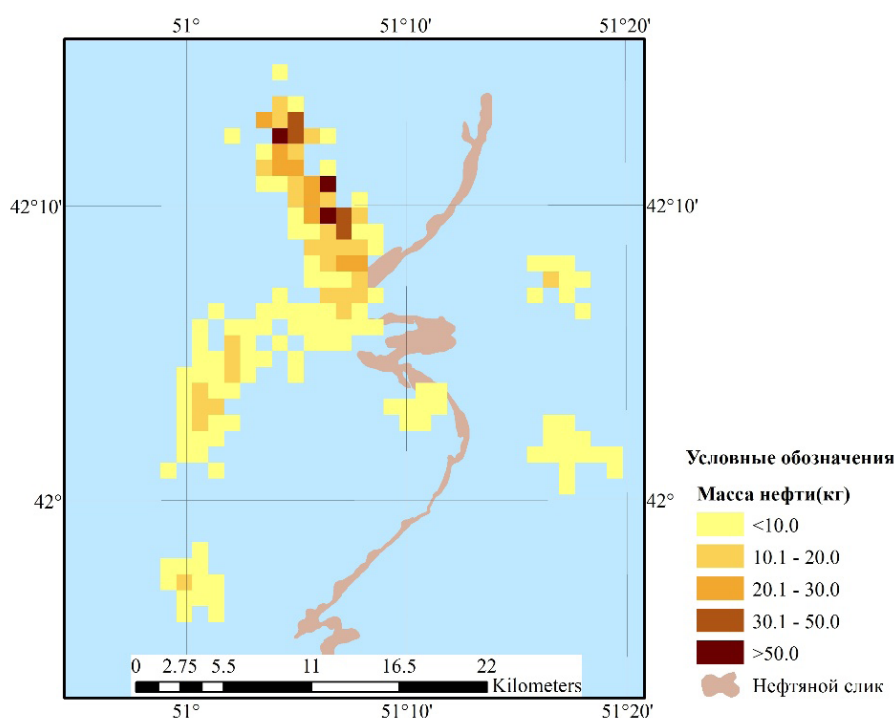
При постановке расчёта использовалась не вся площадь дешифрированного пятна, а только его часть, что связано с существующим в модуле OS MIKE 21 ограничением на количество одновременно задаваемых источников. Тем не менее выбранный фрагмент является репрезентативным и позволяет достоверно определить направление возможного дрейфа загрязнения и характер его трансформации во времени.

Результаты гидродинамического моделирования показали, что в течение 120 часов расчётного времени перемещение пятна носит ограниченный характер, а его конфигурация сохраняется в непосредственной близости от исходного положения. Такое поведение объ-

ясняется тем, что исходный слик расположен в глубоководной части Каспийского моря, где скорости течений невелики, а влияние ветрового дрейфа на интегральный перенос массы ослаблено. В результате адвективный перенос не приводит к существенной миграции загрязнения, и оно сохраняет пространственную приуроченность к району первоначального формирования. Следовательно, в случае разлива сырой нефти, обладающей большей устойчивостью к деструкции, пятно должно было бы фиксироваться на спутниковых снимках, полученных 17 августа, вблизи первоначальной области обнаружения. Отсутствие на этих изображениях (Рисунок 8, Б, В) радиолокационных и оптических признаков загрязнения свидетельствует о быстром разрушении поверхностной плёнки и позволяет интерпретировать наблюдаемое явление как след от сброса нефтесодержащих вод (балластных или льяльных), для которых характерны малая толщина плёнки, интенсивное эмульгирование и диспергирование под воздействием ветровых и волновых процессов.

Рисунок 9

Результаты моделирования растекания нефтяного слика через 120 часов



Примечание: рисунок составлен авторами

Проведённое исследование показало, что привлечение разновременных спутниковых данных в сочетании с результатами гидродинамического моделирования существенно повышает достоверность интерпретации нефтяных загрязнений, позволяя уточнять их природу, оценивать устойчивость плёнки и корректно реконструировать пространственно-временную динамику. Такой комплексный подход обеспечивает более глубокий и физически обоснованный анализ по сравнению с простым дешифрированием снимков.

Перспективы дальнейшего развития работы связаны с интеграцией в разработанную систему сервиса отслеживания судов по данным автоматической идентификационной системы (АИС) на портале MarineTraffic.com (*MarineTraffic*, 2025), что позволит не только фиксировать факты загрязнения, но и устанавливать непосредственные источники их возникновения. Это создаёт основу для перехода к оперативному и доказательному экологическому контролю.

Ограничения исследования

Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода, однако при их интерпретации следует учитывать ряд объективных ограничений. Основное из них связано с отсутствием прямых натурных (*in-situ*) подтверждений для каждого зафиксированного на спутниковых снимках события. Валидация результатов дистанционного зондирования в акватории Каспийского моря затруднена из-за масштабов региона, ограниченной сети регулярных гидрохимических наблюдений и сложности оперативного направления судовых экспедиций к месту обнаруженного слика.

В связи с этим в работе используется двухуровневая система верификации: автоматическое распознавание на основе модели Mask2Former, обученной на ранее опубликованном верифицированном датасете (Krestenitis et al., 2019), дополняется финальной экспертной оценкой. Такой подход соответствует международной практике, поскольку даже самые совершенные модели глубокого обучения не обеспечивают стопроцентной точности распознавания нефтяных плёнок на водной поверхности. Задача характеризуется наличием неопределённостей, связанных с гидрометеорологическими условиями и природными явлениями look-alike.

Комбинация автоматизированной сегментации и экспертного контроля позволяет минимизировать вероятность ложноположительных заключений, но не исключает их полностью. Дальнейшее повышение достоверности интерпретации связывается с интеграцией разработанной системы с данными АИС, что создаёт возможность перехода от вероятностных оценок к установлению конкретных источников загрязнения и усилению оперативного экологического контроля, а также к расширению существующего датасета.

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует высокую эффективность разработанной комплексной системы космического мониторинга нефтяных загрязнений в казахстанском секторе Каспийского моря, которая объединяет автоматизированную обработку радиолокационных снимков Sentinel-1 с использованием архитектуры глубокого обучения Mask2Former, экспертную верификацию и гидродинамическое моделирование в OS MIKE 21. Такой интегрированный подход обеспечивает надежное выявление нефтяных плёнок, точную дифференциацию их от природных явлений типа look-alike, а также прогнозирование пространственно-временной динамики загрязнения с учётом ветрового дрейфа, морских течений и процессов трансформации нефти, включая эмульгирование, диспергирование и седиментацию.

Для одного из наиболее крупных сликков, зафиксированных на снимках Sentinel-1A 16.08.2025, был проведён дополнительный детальный анализ. Результаты показали, что для более точного распознавания характера нефтяного загрязнения необходимо использовать разновременные данные дистанционного зондирования, интегрировать их с результатами гидродинамического моделирования и учитывать комплекс внешних факторов, влияющих на распределение и трансформацию нефти в морской среде. Такой подход позволяет не только повышать достоверность идентификации сликков, но и формировать сценарии их дальнейшего распространения.

Перспективы дальнейшего развития системы включают совершенствование моделей глубокого обучения с целью увеличения точности распознавания нефтяных плёнок и снижения

числа ложноположительных детекций, улучшение алгоритмов обработки сложных сцен и расширение спектра используемых спутниковых и наземных данных. Планируется также интеграция с сервисами отслеживания судов по данным АИС, что создаст возможность связывать обнаруженные загрязнения с конкретными морскими судами и обеспечит оперативный и доказательный контроль за экологической безопасностью.

В долгосрочной перспективе развитие такой комплексной системы позволит создать основу для динамического мониторинга и прогнозирования нефтяных загрязнений в Каспийском море на научной основе. Интеграция спутниковых данных, методов глубокого обучения, гидродинамического моделирования и информации о движении судов открывает возможности для оперативного реагирования на экологические инциденты, оптимизации мер по ликвидации последствий загрязнений и стратегического планирования мер по охране морской среды.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR24992865).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концептуализация – Б.Л. и Т.Д.; Методология – Б.Л.; Программное обеспечение – Б.Л., Б.Н.; Валидация – Б.Л., М.А.; Формальный анализ – Т.Д.; Ресурсы – Б.Н.; Подготовка первоначального текста – Б.Л.; Редактирование и доработка текста – Д.Т., М.А.; Визуализация – М.А.; Научное руководство – Б.Л.; Администрирование проекта – Д.Т.

Литература

- Alpers, W., Holt, B., & Zeng, K. (2017). Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. *Remote Sensing of Environment*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002>
- Catalog APIs. Copernicus. (2025). <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs.html#catalog-apis>
- Cheng, B., Schwing, A. G., & Kirillov, A. (2021). Per-Pixel Classification is Not All You Need for Semantic Segmentation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.06278>
- Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E. V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., & Goodman, S. J. (2025). Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>
- DHI OIL Spil Model. Oil Spill Template. Scientific description. MIKE powered by DHI. (2024). DHI. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2024/General/DHI_OilSpill_Model.pdf
- General Bathymetric Chart of the Oceans. (2025). <https://download.gebco.net/>
- Global Forecast System (GFS). (2025). [https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast#:~:text=The%20Global%20Forecast%20System%20\(GFS\),to%20accurately%20depict%20weather%20conditions](https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast#:~:text=The%20Global%20Forecast%20System%20(GFS),to%20accurately%20depict%20weather%20conditions)
- Hu, C., Lu, Y., Sun, S., & Liu, Y. (2021). Optical Remote Sensing of Oil Spills in the Ocean: What Is Really Possible? *Journal of Remote Sensing (United States)* (Vol. 2021). <https://doi.org/10.34133/2021/9141902>
- Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 9, Number 2). <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>
- Krestenitis, M., Orfanidis, G., Ioannidis, K., Avgerinakis, K., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I. (2019). Oil spill identification from satellite images using deep neural networks. *Remote Sensing*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/rs11151762>
- MarineTraffic. (2025). <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:53.1/centery:41.9/zoom:6>
- Mask2Former. (2025). <https://mask2former.com/>
- MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport module. Scientific Documentation. (2025). DHI.
- Mityagina, M. I., & Kostianoy, A. G. (2025). Mapping Oil Pollution on the Caspian Sea Surface Using Satellite Remote Sensing Data from 2022 to 2024. *Ecologica Montenegrina*, 85. <https://doi.org/10.37828/em.2025.85.10>
- Nurtas, M., Nurakynov, S., Altaibek, A., Mergembayeva, A., & Mohammed, M. A. (2025). Satellite based deep learning approaches for detecting environmental disasters across Kazakhstan. *Discover Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08133-4>
- Sentinel-1. Radar vision for Copernicus. (2025). https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1

Балакай, Л., Дедова, Т., Сагатдинова, Г., & Чепашев, Д. (2024). Технология автоматизированного распознавания и моделирования распространения нефтяного загрязнения по акватории Каспийского моря. *Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи*, 3(66), 78–94. https://doi.org/10.51775/2790-0886_2024_66_3_78

Булавина, М. А., & Герасимов, В. И. (Eds.). (2025). *Экосистема Каспия: ключевые проблемы и решения: материалы международной научно-практической конференции*. Издательский дом «УМЦ».

References

Alpers, W., Holt, B., & Zeng, K. (2017). Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. *Remote Sensing of Environment*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002>

Catalog APIs. Copernicus. (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs.html#catalog-apis>

Cheng, B., Schwing, A. G., & Kirillov, A. (2021). Per-Pixel Classification is Not All You Need for Semantic Segmentation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.06278>

Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E. V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., & Goodman, S. J. (2025). Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth and Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>

DHI OIL Spil Model. Oil Spill Template. Scientific description. MIKE powered by DHI. (2024). DHI. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2024/General/DHI_OilSpill_Model.pdf

General Bathymetric Chart of the Oceans. (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from <https://download.gebco.net/>

Global Forecast System (GFS). (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from [https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast#:~:text=The%20Global%20Forecast%20System%20\(GFS\),to%20accurately%20depict%20weather%20conditions](https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast#:~:text=The%20Global%20Forecast%20System%20(GFS),to%20accurately%20depict%20weather%20conditions)

Hu, C., Lu, Y., Sun, S., & Liu, Y. (2021). Optical Remote Sensing of Oil Spills in the Ocean: What Is Really Possible? In *Journal of Remote Sensing (United States)* (Vol. 2021). <https://doi.org/10.34133/2021/9141902>

Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 9, Number 2). <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>

Krestenitis, M., Orfanidis, G., Ioannidis, K., Avgerinakis, K., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I. (2019). Oil spill identification from satellite images using deep neural networks. *Remote Sensing*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/rs11151762>

MarineTraffic. (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:53.1/centery:41.9/zoom:6>

Mask2Former. (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from <https://mask2former.com/>

MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport module. Scientific Documentation. (2025). DHI.

Mityagina, M. I., & Kostianoy, A. G. (2025). Mapping Oil Pollution on the Caspian Sea Surface Using Satellite Remote Sensing Data from 2022 to 2024. *Ecologica Montenegrina*, 85. <https://doi.org/10.37828/em.2025.85.10>

Nurtas, M., Nurakynov, S., Altaibek, A., Mergembayeva, A., & Mohammed, M. A. (2025). Satellite based deep learning approaches for detecting environmental disasters across Kazakhstan. *Discover Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08133-4>

Sentinel-1. Radar vision for Copernicus. (n.d.). Retrieved February 20, 2026, from https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1

Balakai L., Dedova T., Sagatdinova G., Chepashev D. (2024) Tekhnologiya avtomatizirovannogo raspoznavaniya i modelirovaniya rasprostraneniya neftyanogo zagryazneniya po akvatorii Kaspiiskogo morya [Technology for Automated Recognition and Modeling of Oil Pollution Dispersion in the Caspian Sea Area]. *Vestnik Almatinskogo Universiteta Energetiki i Svyazi*, vol. 3, no 66, pp. 78–94. https://doi.org/10.51775/2790-0886_2024_66_3_78

Bulavina M.A., Gerasimov V.I. (eds.) (2025) *Ekosistema Kaspiya: klyuchevye problemy i resheniya: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Caspian Ecosystem: Key Problems and Solutions: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*. Izdatel'skii dom "UMTs".

Сведения об авторах:

Л.А. Балакай – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: balakay@ionos.kz).

Т.В. Дедова – кандидат технических наук, заведующая лабораторией, ТОО «Институт ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: dedova@ionos.kz).

Н.З. Баширова – старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: bashyrova@ionos.kz).

А.А. Мерекеев (корреспондирующий автор) – PhD-докторант, старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы» (Алматы, Казахстан, e-mail: aibek.merekeyev@ionos.kz).

Information about authors:

L.A. Balakay – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, LLP “Institute of Ionosphere”, (Almaty, Kazakhstan, balakay@ionos.kz).

T.V. Dedova – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, LLP “Institute of Ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, dedova@ionos.kz).

N.Z. Bashirova – Senior Researcher, LLP “Institute of Ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, bashyrova@ionos.kz, ORCID: 0009-0001-9235-1048).

A.A. Merekeyev (corresponding author) – PhD Student, Senior Researcher, LLP “Institute of Ionosphere” (Almaty, Kazakhstan, aibek.merekeyev@ionos.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Л.А. Балакай – техника ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, «Ионосфера институты» ЖШС (Алматы, Қазақстан, balakay@ionos.kz).

Т.В. Дедова – техника ғылымдарының кандидаты, зертхана меңгерушісі, «Ионосфера институты» ЖШС (Алматы, Қазақстан, dedova@ionos.kz).

Н.З. Баширова – аға ғылыми қызметкер, «Ионосфера институты» ЖШС (Алматы, Қазақстан, bashyrova@ionos.kz).

А.А. Мерекеев (корреспонденттік автор) – PhD докторант, аға ғылыми қызметкер, «Ионосфера институты» ЖШС (Алматы, Қазақстан, aibek.merekeyev@ionos.kz).

Поступила: 15 декабря 2025 года

Принята: 10 февраля 2026 года