

Геоинформатика. 2024. № 1. С. 55–67.  
*Geoinformatika*. 2024;(1):55–67.

Геоэкология

Научная статья  
 УДК 528.88 + 528.94 + 550.834.05  
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-55-67>

## Дешифрирование нефтепроявлений и определение их происхождения с использованием данных морской сейсморазведки: на примере западной континентальной окраины Индии

© 2024 г. — Дмитрий Сергеевич Логинов

ООО «Целевой Горизонт»; Россия, Москва

[loginov@cartlab.ru](mailto:loginov@cartlab.ru)

**Аннотация:** В статье рассмотрен опыт совместного использования данных дистанционного зондирования Земли, материалов морской сейсморазведки и открытых геоданных для поиска естественных нефтепроявлений минерального происхождения. Исследование выполнено в рамках оценки перспектив нефтедобычи в шельфовой части осадочных бассейнов Аравийского моря на западном побережье полуострова Индостан. Методология исследования основана на визуальном дешифрировании нефтепроявлений естественного и антропогенного происхождения по мультиспектральным изображениям Sentinel-2. Современные данные морской сейсморазведки используются для установления минерального происхождения нефтепроявлений по наличию резервуаров и системы разломов как возможных источников углеводородов и каналов для их миграции на поверхность соответственно. По итогам исследования определены зоны скопления естественных минеральных нефтепроявлений, приуроченных к западной континентальной окраине Индии. Даны рекомендации по проведению геологоразведочных работ в осадочных бассейнах Kutch, Saurashtra и Kerala-Konkan. Полученный опыт визуального дешифрирования мультиспектральных спутниковых данных подтверждает эффективность использования материалов морской сейсморазведки при выделении естественных нефтяных пятен минерального происхождения в районах интенсивного судоходства, к которым относится исследуемая акватория. Предложенная методика исследования может быть использована в качестве косвенной оценки перспектив нефтедобычи на западной континентальной окраине Индии и в других акваториях Мирового океана.

**Ключевые слова:** Аравийское море, визуальное дешифрирование, естественные нефтепроявления, западная континентальная окраина Индии, морская сейсморазведка, Sentinel-2

*Для цитирования:* Логинов Д.С. Дешифрирование нефтепроявлений и определение их происхождения с использованием данных морской сейсморазведки: на примере западной континентальной окраины Индии // Геоинформатика. — 2024. — № 1. — С. 55–67. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-55-67>.

Geoecology

Original article

## Interpretation and origin determination of oil seepages using marine seismic data: a case study of the Western Continental Margin of India

© 2024 — Dmitry S. Loginov

Limited liability company "Tselevoi Gorizont"; Moscow, Russia

[loginov@cartlab.ru](mailto:loginov@cartlab.ru)

**Abstract:** This article discusses the experience of a joint using remote sensing data, marine seismic data and open geoscientific data to search for natural mineral oil seepages. The study was carried out as part of an assessment of oil prospects in the offshore sedimentary basins of the Arabian Sea on the west coast of the Indian Peninsula. The methodology is based on visual interpretation of natural and anthropogenic oil seepages using Sentinel-2 multispectral imageries. Modern offshore seismic data is used to establish the mineral origin of oil seepages by the presence of reservoirs and fault systems as possible sources of hydrocarbons and channels for their migration to the surface, respectively. The final map of detected oil seepages location is the result of research. Areas of natural mineral oil seepages accumulation confined to the western continental margin of India have been identified. Recommendations for exploration activities in the Kutch, Saurashtra and Kerala-Konkan offshore sedimentary basins were given. The acquired experience of visual interpretation of multispectral satellite data confirms efficiency of marine seismic data application for delineation of natural oil seepages of mineral origin in the areas of intensive navigation. The proposed methodology of research can be used as an indirect assessment of oil prospects in the Western Continental Margin of India and other areas of the world ocean.

**Key words:** Arabian Sea, visual interpretation, natural oil seepages, Western Continental Margin of India, marine seismic data, Sentinel-2

*For citation:* Loginov D.S. Interpretation and origin determination of oil seepages using marine seismic data: a case study of the Western Continental Margin of India. *Geoinformatika*. 2024;(1):55–67. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-1-55-67>. In Russ.

## Введение

Дистанционное зондирование Земли (далее — ДЗЗ) в геологоразведке является эффективным методом получения информации, необходимой для уточнения геологического строения земной поверхности. Мультиспектральные, гиперспектральные, радарные снимки находят широкое применение в линеаментном анализе, экологическом мониторинге состояния окружающей среды в зонах нефтедобычи и других задачах. Вместе с тем широкие предпосылки для оценки перспектив нефтегазности открываются при поиске естественных нефтепроявлений в акваториях Мирового океана с применением ДЗЗ. Особый интерес представляют нефтепроявления минерального происхождения, которые выступают в качестве одного из географических индикаторов наличия потенциальных нефтеносных структур в пределах акваторий морей и океанов. В этой связи результаты интерпретации данных ДЗЗ в сочетании с анализом комплекса геоданных, в том числе полученных по итогам сейсморазведочных работ, дают весомые возможности для выполнения первичной оценки нефтегазового потенциала акватории и принятия решений о проведении дорогостоящих детальных геофизических исследований и последующего бурения выявленных структур на шельфе.

Целью настоящего исследования является проверка эффективности совместного использования данных ДЗЗ, морских 2D-сейсморазведочных данных и других открытых источников информации для обнаружения поверхностных нефтепроявлений и определения их происхождения. Исследование выполнено в рамках оценки перспектив нефтедобычи на западной континентальной окраине вулканического шельфа Аравийского моря в пределах морской части осадочных бассейнов Kutch, Saurashtra, Kerala-Konkan, Mannar, находящихся в пределах исключительной экономической зоны Республики Индия.

## Естественные нефтепроявления и подходы к их выявлению

Изучению нефтепроявлений на поверхности морей и океанов посвящено большое количество публикаций, в которых освещаются различные аспекты способов обнаружения нефтяных пятен, прогноза их локализации и происхождения. Основную долю составляют экологические исследования, направленные на поиск антропогенных проявлений нефти, вызванных разливами углеводородов от судов и буровых платформ и другими последствиями хозяйственной деятельности человека [2, 4, 7, 4]. Вместе с тем при определении перспектив нефтегазности особый интерес представляют нефтепроявления минерального (термогенного) происхождения. Такие нефтепроявления образуются вследствие миграции углеводородов из резервуара через разломы и трещины в осадочных породах,

через обнажения нефтеносных слоев, через различные донные морфологические формы рельефа (грязевые вулканы, покмарки, сипы, грифоны и др.). После высвобождения сырая нефть выходит на поверхность моря, образуя нефтяные пятна, которые можно обнаружить с помощью дистанционных методов зондирования. Широкое применение находят данные мультиспектральных спутниковых систем [3, 13], радиолокационной съемки [1, 21, 25] и их сочетание [2]. Разработаны и апробированы методики визуального [4, 5] и автоматизированного [11] дешифрирования нефтепроявлений, позволяющие не только локализовать объекты, но и оценить их геометрические параметры, моделировать и прогнозировать пути дальнейшего движения [16].

Наличие большого числа исследований подтверждает многогранность нефтепроявлений как объекта исследования, который остается «сложным и до конца не изученным» явлением [5] в силу периодичности возникновения и зависимости нефтепроявлений от многочисленных факторов, в том числе от геологического строения морского дна, геодинамической обстановки, климатических, метеорологических и гидрологических особенностей акваторий. Поскольку нефтяные пятна могут являться результатом антропогенного загрязнения акваторий, а также биогенного разложения морских организмов, необходимой задачей, влияющей на принятие последующих решений, является установление характера происхождения того или иного нефтяного пятна, обнаруженного по спутниковым данным. Несмотря на достаточную проработанность дистанционных методов, следует привлекать комплекс геоданных, позволяющих анализировать геологическое строение и рельеф морского дна, а также другие характеристики, влияющие на появление и распространение нефтяных пятен (например, скорость и направление ветра, подводных течений, интенсивность судоходства). В этом отношении материалы морской сейсморазведки могут быть полезны для определения потенциальных источников нефтепроявлений различной глубины залегания, структурных элементов и путей миграции углеводородов из резервуара на поверхность. Это предположение подтверждается положительным опытом комплексного использования геохимических, гравиметрических и других геофизических данных [9, 20, 23] при исследовании осадочных бассейнов Индии.

## Материалы и методы исследования

### Территория исследования

Исследование выполнено для акватории западной континентальной окраины Индии, которая представляет собой сложный в геологическом и тектоническом плане регион с действующей системой вулканизма [8, 22, 24]. Акватория хорошо изучена сейсморазведочными работами, которые были выполнены в рамках исследований геологического

строения следующих морских осадочных бассейнов [19]:

- индийская часть бассейна Mannar (Категория-I, в которых имеются запасы и уже ведется добыча);
- бассейны Kutch, Saurashtra (Категория-II с условными ресурсами, ожидающими коммерческого производства);
- бассейн Kerala-Konkan (Категория-III перспективными ресурсами, ожидающими обнаружения).

Выбор региона исследования также обусловлен тем, что в силу наличия высокоинтенсивного морского судоходства здесь представлен весь спектр антропогенных и природных нефтепроявлений. Обнаружение естественных нефтепроявлений минерального происхождения как свидетельства присутствия нефтяной системы может быть полезным в контексте оценки перспектив нефтегазоносности западной континентальной окраины Индии, вы-

полняемой в настоящее время Directorate General of Hydrocarbons (DGH). В текущем исследовании не рассматривается Бомбейский нефтегазоносный бассейн в силу его высокой степени изученности и наличия действующей инфраструктуры по добыче нефти и газа на крупных месторождениях (включая Mumbai High Field). Таким образом, общая площадь исследования составила 487 700 км<sup>2</sup>.

**Методика исследования**

Для выполнения текущего исследования разработана и апробирована методика (рис. 1), в основе которой лежит использование актуальных и достоверных открытых источников спутниковой информации для локализации нефтепроявлений, а также материалов сейсморазведки для верификации их происхождения.

В результате анализа предыдущих исследований принято решение использовать данные Sentinel-2 с максимальным пространственным раз-

Рис. 1. Методика исследования

Fig. 1. Research methodology



решением 10 метров. Через геопортал EarthExplorer было получено 60 сцен мультиспектральных изображений, охватывающих до 70% акватории картографирования с минимальной облачностью. Также для учета периодичности возникновения нефтепроявлений привлекались архивные данные Landsat-8 и Landsat-9.

Помимо данных ДЗЗ, использованы открытые источники метеорологических, геологических, батиметрических данных, а также информации о судоходных путях в пределах акватории исследования. Материалы региональной морской сейсморазведки МОГТ 2D (метод общей глубинной точки) предоставлены из Oil & Natural Gas Corporation (ONGC). В таблице 1 представлен полный перечень источников информации, использованных в текущем исследовании.

Последующие экспериментальные работы (включая дешифрирование данных ДЗЗ) были выполнены в едином геоинформационном пространстве в географической информационной системе ArcGIS, где отмеченные ранее данные представлены в виде слоев карт (рис. 2). Визуальный анализ временных сейсмических разрезов осуществлялся в специализированном программном комплексе Petrel.

### Дешифрирование и классификация нефтепроявлений

Несмотря на развитие автоматизированных средств распознавания образов по космическим снимкам, визуальный метод дешифрирования данных ДЗЗ остается преобладающим в большинстве исследований, связанных с поиском нефтепроявлений. В условиях высокоинтенсивного морского движения, характерного для акватории исследования (рис. 2 В), автоматические методы могут привести к обнаружению большого количества шумовых сигналов. Их последующее отделение от полезного сиг-

нала потребовало бы много времени и интерактивного анализа, поэтому было решено использовать визуальный метод дешифрирования мультиспектральных спутниковых изображений.

Учитывая мировой опыт выявления сырой нефти, легких фракций нефтепродуктов, разливов тяжелой нефти по данным ДЗЗ, для дешифрирования использовались каналы В4 и В5 спутниковой системы Sentinel-2В, соответствующие диапазону частот 600–700 нм, а также канал В8 (842 нм) с пространственным разрешением 10 метров. В этих диапазонах помехи от морского дна минимальны, а нефтяное пятно выглядит ярче, чем окружающая вода.

Основными дешифровочными признаками нефтепроявлений стали темный тон, контрастность и однородность пятна, форма, соотношение сторон и характер границ. Однако темный тон характерен не только для нефтепроявлений, но и для атмосферных явлений, таких как апвеллинг, внутренние волны, дождевые ячейки, ветровые тени [11]. Поэтому для эффективного визуального анализа осуществлялся интерактивный учет отмеченных ранее геоданных.

Поиск, оконтуривание нефтепроявлений и внесение их в базу геоданных сопровождалось первичной оценкой их наиболее вероятного происхождения. Учитывая результаты аналогичных исследований, выполненных в том числе на западном [23, 25] и восточном [9, 20] побережьях полуострова Индостан, была принята следующая классификация нефтепроявлений:

1. Антропогенные нефтяные пятна от морских судов.
2. Антропогенные загрязнения (утечки с буровых платформ, нефтяные разливы большой площади, результаты хозяйственной деятельности).

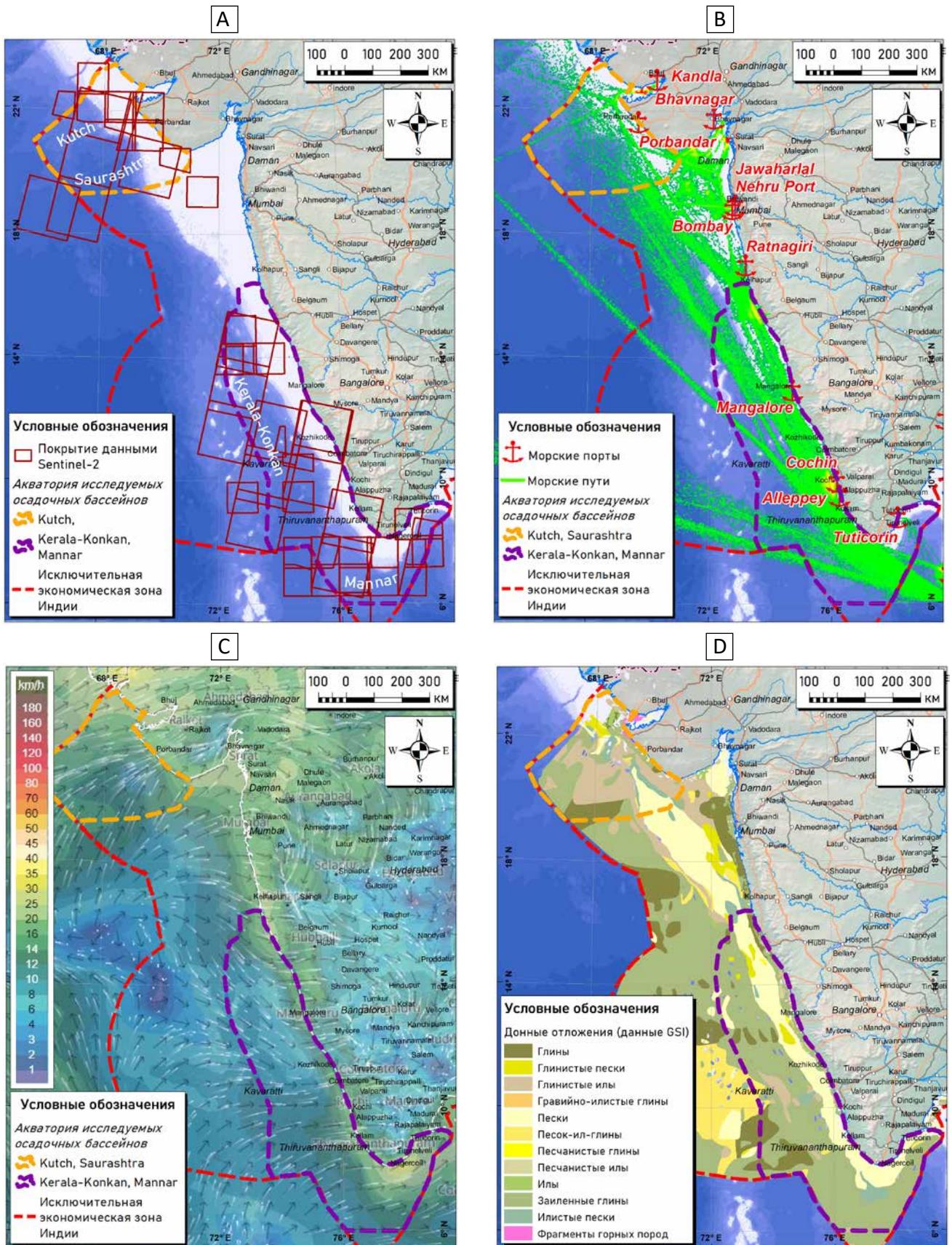
Табл. 1. Характеристика данных для исследования

Tab. 1. Data characteristics for the study

Данные	Применение	Источники
ДЗЗ	Визуальное дешифрирование нефтепроявлений естественного и антропогенного происхождения	Sentinel-2B, Landsat-8/9 [20]
Сейсмические	Анализ геологического строения морского дна, выявление нефтяных резервуаров, структурных ловушек, путей миграции сырой нефти	ONGC
Батиметрические	Изучение морфологических форм рельефа дна океана	GEBCO [21]
Метеорологические	Оценка скорости ветра, направления и скорости течений	Meteoblue [22]
Судоходство	Определение нефтяных пятен – результатов антропогенного загрязнения в зонах интенсивного судоходства	Marine Traffic [23]
Геологические	Анализ сейсмотектонической обстановки, состава донных отложений и др.	GSI [24]

Рис. 2. Геоданные открытого доступа: А — покрытие загруженных данных ДЗЗ, В — интенсивность морского трафика и основные морские порты, С — направление ветра в марте и апреле, D — донные морские отложения

Fig. 2. Open access geoscientific data: A — coverage of downloaded ERS data, B — marine traffic intensity and major seaports, C — wind direction in March and April, D — bottom marine sediments



3. Естественные биогенные нефтепроявления (результат разложения планктона, жизнедеятельности морских организмов).

4. Потенциальные (минеральные) нефтяные проявления, приуроченные к придонным или глубоко залегающим резервуарам (результат просачивания углеводородов из материнских пород).

В первую очередь были классифицированы нефтяные пятна от морских судов по темному пятну линейной формы, повторяющей траекторию движения судна, и по сопровождающей его характерной яркой точке — отражению света от металлического корпуса судна (рис. 3А). Комплексный анализ собранных открытых геоданных подтвердил, что большинство объектов находится в зоне интенсивного судоходства, проходящего в пределах континентального шельфа. Линейная конфигурация нефтяных пятен обусловлена весенней циркуляцией вод верхнего слоя, сформированной муссонной системой ветров северо-западного направления. Далее были распознаны крупномасштабные загрязнения в прибрежных заливах и в зоне действующей нефтедобычи (рис. 3В).

В итоге 129 нефтепроявлений были классифицированы как результат антропогенного загрязнения акватории. Остальные 74 объекта в равной степени могут быть биогенными или минеральными нефтепроявлениями, поскольку их образы на космическом снимке не имеют яркого эмиссионного пятна и вытянутой в одном направлении формы. Напротив, их края довольно размыты, а площадь меняется в зависимости от возраста пятна, скорости приповерхностного ветра и направления течения. Кроме того, потенциальные минеральные и биоген-

ные нефтяные пятна одинаково обнаруживаются только на одиночных снимках и исчезают на изображениях суточной и более давности.

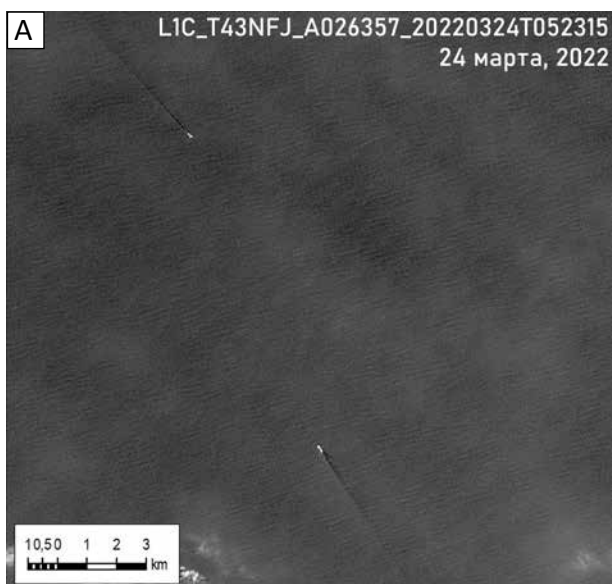
Учитывая весенний период проведения исследования, благоприятный с точки зрения преобладания фазы старения и невысокого уровня развития планктона, биогенные нефтепроявления, образующиеся в результате сложных биохимических реакций в процессе жизнедеятельности и распада морских организмов, могут иметь минимальное распространение. Однако минеральное происхождение конкретного нефтяного пятна может быть подтверждено только при наличии глубокозалегающих или приповерхностных резервуаров (геологических структур) и путей миграции сырой нефти на морскую поверхность. Таким образом, минеральное происхождение неклассифицированных пятен должно быть подтверждено данными морской сейсморазведки.

#### Анализ данных морской сейсморазведки

Анализ сейсмических данных выполнялся в пределах распространения объектов, ранее классифицированных как потенциальные и биогенные нефтепроявления, следующим способом (рис. 4):

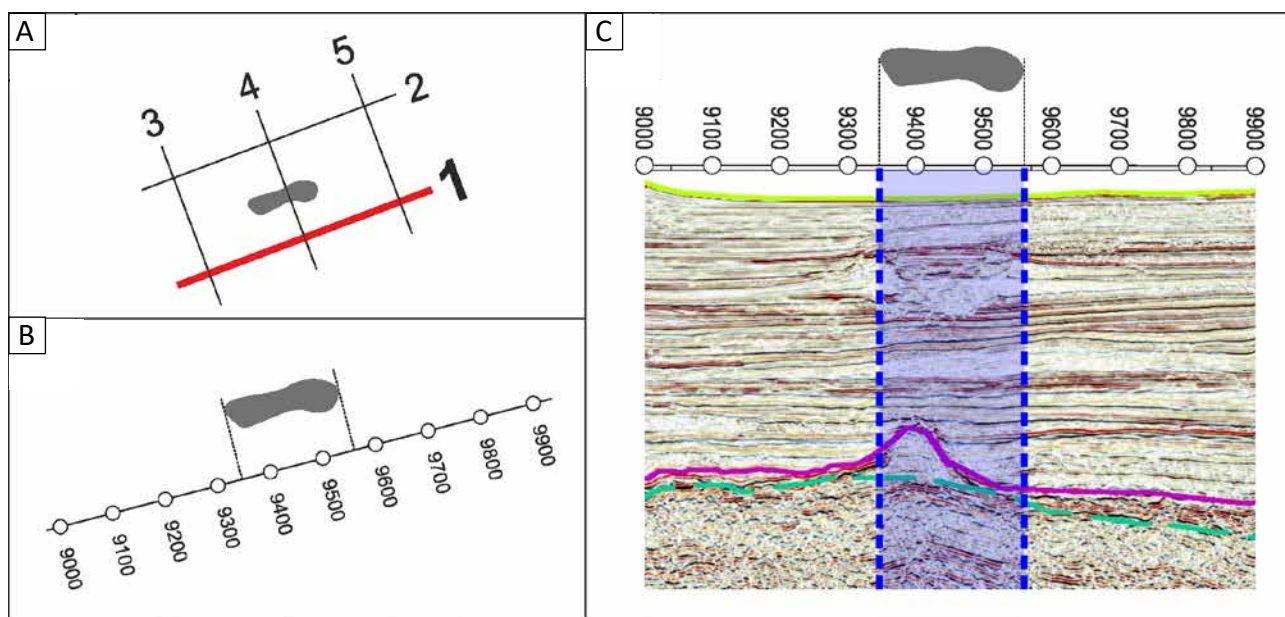
1. Выбор сейсмического профиля, ближайшего к большей части зарегистрированного нефтепроявления (рис. 4А).
2. Определение диапазона общих глубинных точек (ОГТ), в пределах которого находится ортогональная проекция нефтепроявления на сейсмический профиль (рис. 4В).
3. Визуальный анализ фрагмента сейсмического разреза в пределах диапазона ОГТ (рис. 4С).

**Рис. 3.** Примеры нефтяных пятен на фрагментах снимков Sentinel-2: А — вызванные судами (светлое пятно — судно, темная черта — смесь отработанного топлива и турбулентного следа от движения судна), В — вызванные разливами с платформ и судов  
 Fig. 3. Examples of oil seepages in Sentinel-2 imageries: А — caused by ships (light slick — ship, dark line — fuel waste mixture and turbulent trail from ship movements), В — caused by spills from platforms and ships



**Рис. 4.** Схема технологии использования сейсмических данных для оценки минерального происхождения нефтепроявлений (пояснения даны в тексте)

*Fig. 4. Scheme of technology for using seismic data to assess the mineral origin of oil seepages (explained in the text)*



Представленный способ является условным, поскольку для сопоставления нефтяного пятна, обнаруженного на поверхности моря по данным космической съемки, и его источника на сейсмическом разрезе предполагается, что пятно находится строго над источником. В реальности редкие нефтепроявления обнаруживаются непосредственно над областью выполнения морской сейсморазведки, поскольку локализация нефтяного пятна меняется под действием ветра, придонных и приповерхностных течений. Кроме того, в условиях разреженной сети профилей, ближайший к нефтепроявлению сейсмический профиль может находиться на расстоянии более 10 км. Тем не менее, такой подход позволяет использовать доступные материалы морской сейсморазведки для уточнения происхождения нефтепроявлений, обнаруженных по данным ДЗЗ. На следующих фрагментах временных сейсмических разрезов синей заливкой показано продолжение ортогональной проекции нефтепроявлений, красными линиями отмечены интерпретированные разрывные нарушения и трещины, линиями другого цвета — корреляция сейсмических горизонтов, позволяющая сопоставить глубину залегания потенциальных резервуаров.

Анализ временных сейсмических разрезов в пределах каждого осадочного бассейна дал следующие результаты. В морской части бассейнов Kutch, Saurashtra обнаружена сеть активных разломов, которые могут быть путями естественной миграции углеводородов и причиной выхода нефти на поверхность моря (рис. 5А). Следы глубинной миграции углеводородов через осадочный чехол относятся к

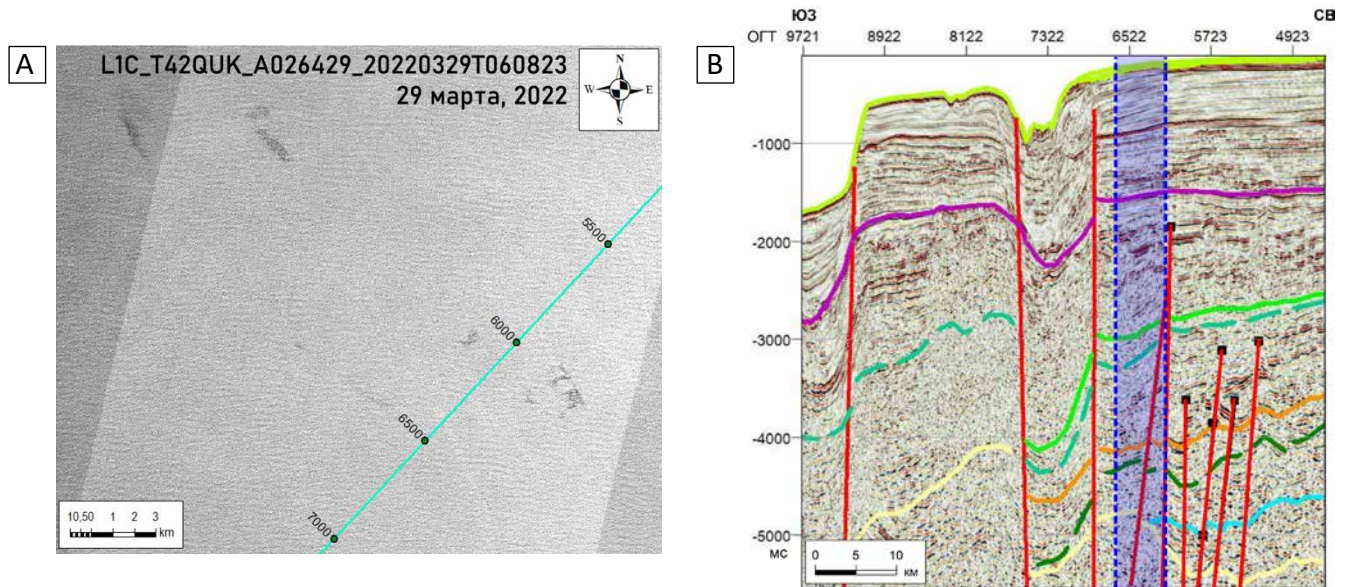
неоген-четвертичным выходам газогидратов через приповерхностную сеть разломов и трещин. Однако в этих зонах нет очевидных ловушек нефтегазоносных коллекторов, в которых могли бы накапливаться продуктивные отложения (рис. 5В). Исключение составляет северо-западная часть бассейна Kutch, где под тонкими слоями алевроитовой глины наблюдаются скопления газогидратов над карбонатными структурами (рис. 4С). Таким образом, группа нефтепроявлений, обнаруженная на бровке континентального шельфа, с большой долей вероятности относится к минеральным нефтепроявлениям.

В пределах осадочного бассейна Kerala-Konkan в зоне обнаруженных нефтепроявлений помимо проводящей системы разломов наблюдаются мезозойские объекты, которые могут служить коллекторами. На рис. 6 представлен пример интерпретированного временного разреза сейсмического профиля, вблизи которого по данным ДЗЗ обнаружены четыре нефтепроявления со средней площадью около 0,6 км<sup>2</sup>. Объекты расположены в благоприятной зоне донных отложений, а система разломов в Конканском грабене и Лакшадвипской впадине подтверждается сейсмотектоническими данными Геологической службы Индии. Следует отметить, что нефтепроявления в этой части бровки шельфа были замечены при выполнении аналогичного исследования по радарным снимкам в 2007 году [23]. Таким образом, можно говорить о наличии постоянного глубинного источника углеводородов.

В южной части акватории исследования, которая относится к индийской части бассейна Mannar, было обнаружено минимальное количество нефте-

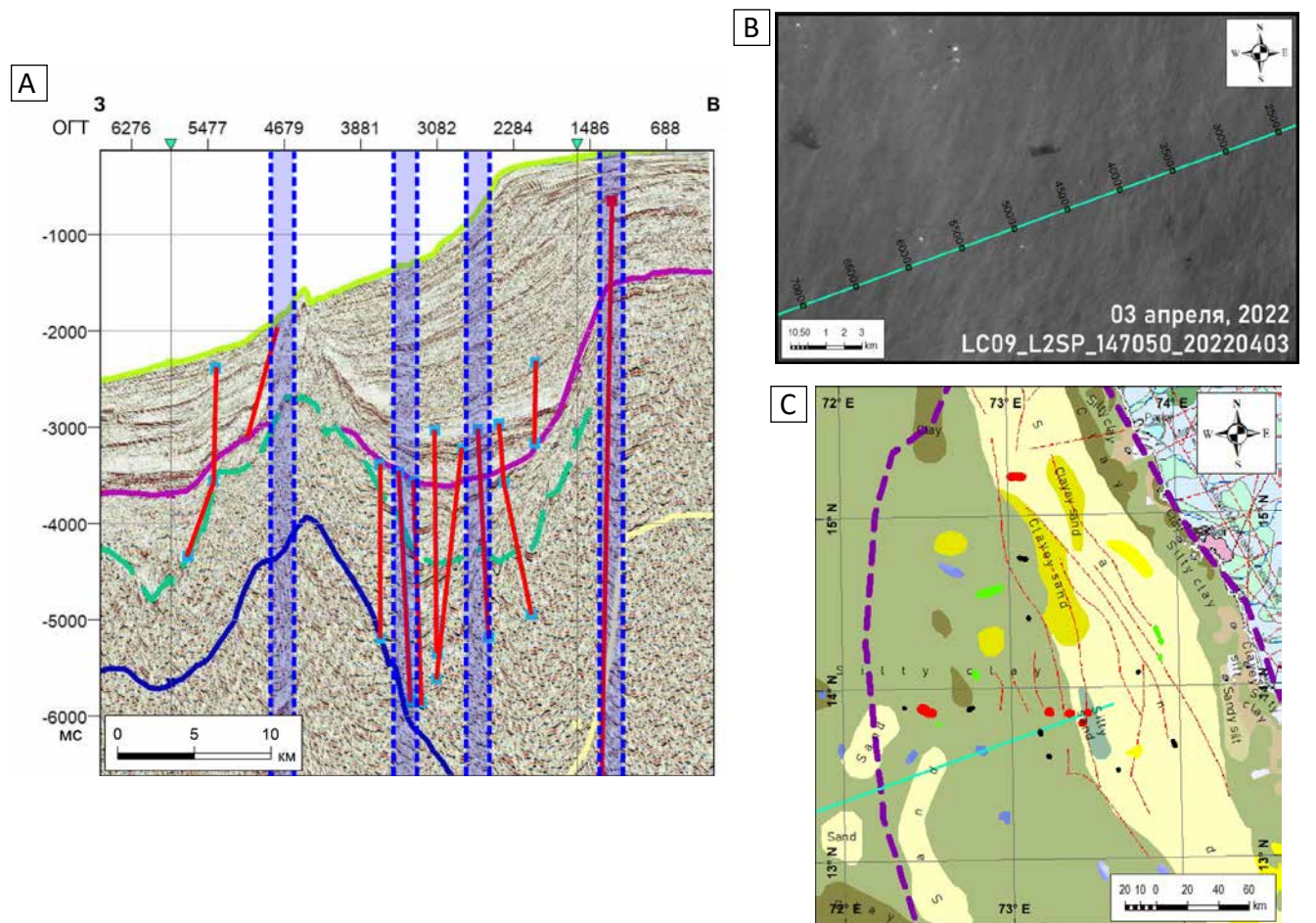
**Рис. 5.** Сопоставление группы нефтепроявлений и ближайшего сейсмического профиля: А — фрагмент снимка Sentinel-2, В — фрагмент временного сейсмического разреза профиля № 2

*Fig. 5. Comparison of the oil seepages group and the nearest seismic line: A — fragment of Sentinel-2 image, B — fragment of seismic time section № 2*



**Рис. 6.** Сопоставление временного сейсмического разреза № 7 с группой нефтепроявлений и открытых геологических данных: А — фрагмент сейсмического разреза, В — фрагмент снимка Sentinel-2, С — положение группы нефтепроявлений относительно крупных разрывных нарушений и областей распространения морских отложений

*Fig. 6. Comparison of seismic time section #7 with a group of oil seepages and open geological data: A — fragment of seismic time section, B — fragment of Sentinel-2 image, C — position of the oil seepages group relative to large faults and areas of marine sediment distribution*



проявлений. Их происхождение является преимущественно биогенным, поскольку на сейсмических разрезах не обнаружены значимые структурные ловушки и системы активных разломов. Дополнительным фактором является развитие рыболовства, о чем свидетельствует наличие маломерного судостроения в этом регионе. Между тем, заслуживает внимания один уникальный объект с резкими перьевидными границами общей длиной 6 км и шириной 0,5 км, соотношение сторон 12:1 (рис. 7А). На космическом снимке, полученном через 5 дней, это пятно не было обнаружено. Отсутствие доступных сейсмических данных вблизи объекта не позволяет определить потенциальные источники нефти. Тем не менее, на сейсмическом разрезе, расположенном в 30 км к северу от выявленного пятна, наблюдается замкнутая мезозойская система, осложненная разломами (рис. 7В). Предположительно нефть может периодически просачиваться под действием давления или других факторов, поэтому объект, предварительно классифицированный как «биогенный», может быть индикатором имеющейся углеводородной системы. Однако следует отметить, что похожее по форме и размерам пятно было выявлено в Каспийском море и классифицировано исследователями как нефтяной разлив средней степени достоверности [1].

**Результаты исследования**

В ходе визуального дешифрирования материалов ДЗЗ выявлено 203 объекта, чьи дешифровочные признаки (в первую очередь темный тон) позволяют классифицировать их как нефтепроявления. С учетом проведенного анализа материалов морской сейсморазведки и различных геоданных уточнено происхождение пятен, которые не обуслов-

лены антропогенными загрязнениями различного характера. В результате только 11% от общего числа обнаруженных нефтепроявлений классифицированы как потенциальные минеральные (рис. 8А). Локализация нефтепроявлений представлена на итоговой карте (рис. 8В).

**Обсуждение**

Анализ пространственного положения потенциальных нефтепроявлений минерального происхождения показывает, что большая часть объектов расположена вдоль границы континентального шельфа в районе осадочных бассейнов Kutch и Saurashtra. В бассейнах Kerala-Konkan и Mannar основное распространение получили антропогенные нефтяные пятна от морских судов, что прямо соответствует данным о морском судоходстве, которое развито в этой части исследуемой акватории. Минеральные нефтепроявления также выявлены в северной части впадины Lakshadweep, что фактически подтверждает результаты аналогичного исследования, полученные в 2007 году [23]. В южной части акватории исследования найдены единичные объекты, приуроченные к платформе Allerpreu и рифтовой зоне Mannar.

Выделенные зоны с развитой системой разломов и трещин при условии достаточной зрелости исходной породы изучаемых бассейнов могут выступать в качестве каналов выхода углеводородов из недр в открытый океан в виде нефтепроявлений, поэтому представляют основной интерес для последующих геологоразведочных работ. При этом приуроченность потенциальных объектов к границам шельфа позволяет утверждать, что они косвенно связаны с такими морфологическими объектами, как покмарки и грязевые вулканы. Эти объекты

**Рис. 7.** Анализ происхождения нефтепроявления в бассейне Mannar: А — уникальный объект с резкими перьевидными границами на фрагменте снимка Sentinel-2, В — фрагмент ближайшего временного сейсмического разреза

*Fig. 7. Analysis of the oil seepage origin in Mannar Basin: А — a unique object with sharp feather-like boundaries on a fragment of Sentinel-2 imagery, В — a fragment of the nearest seismic time section*

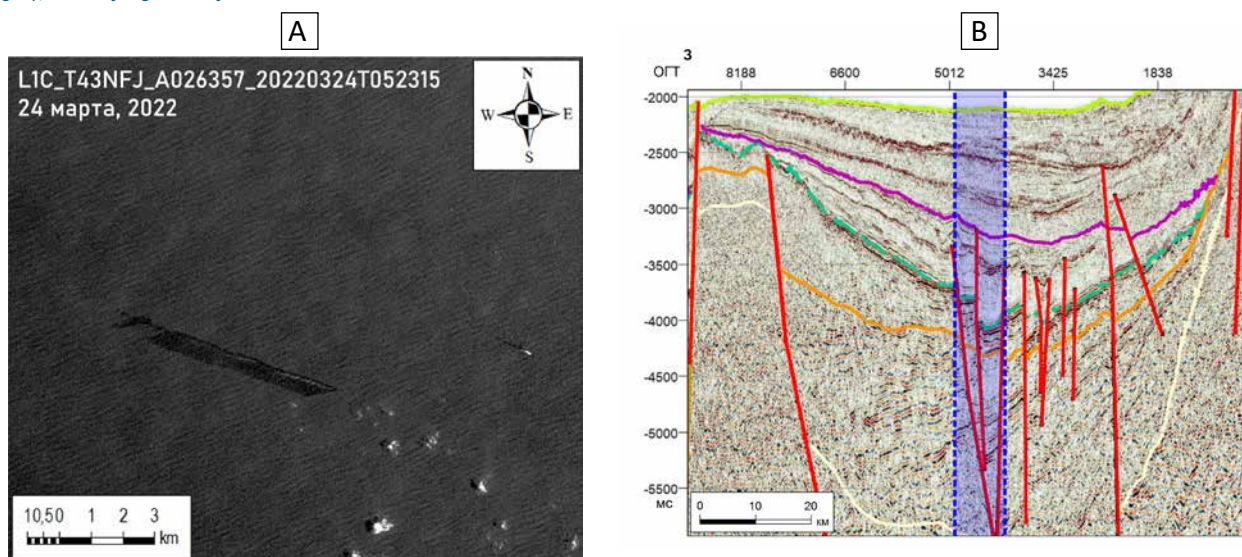
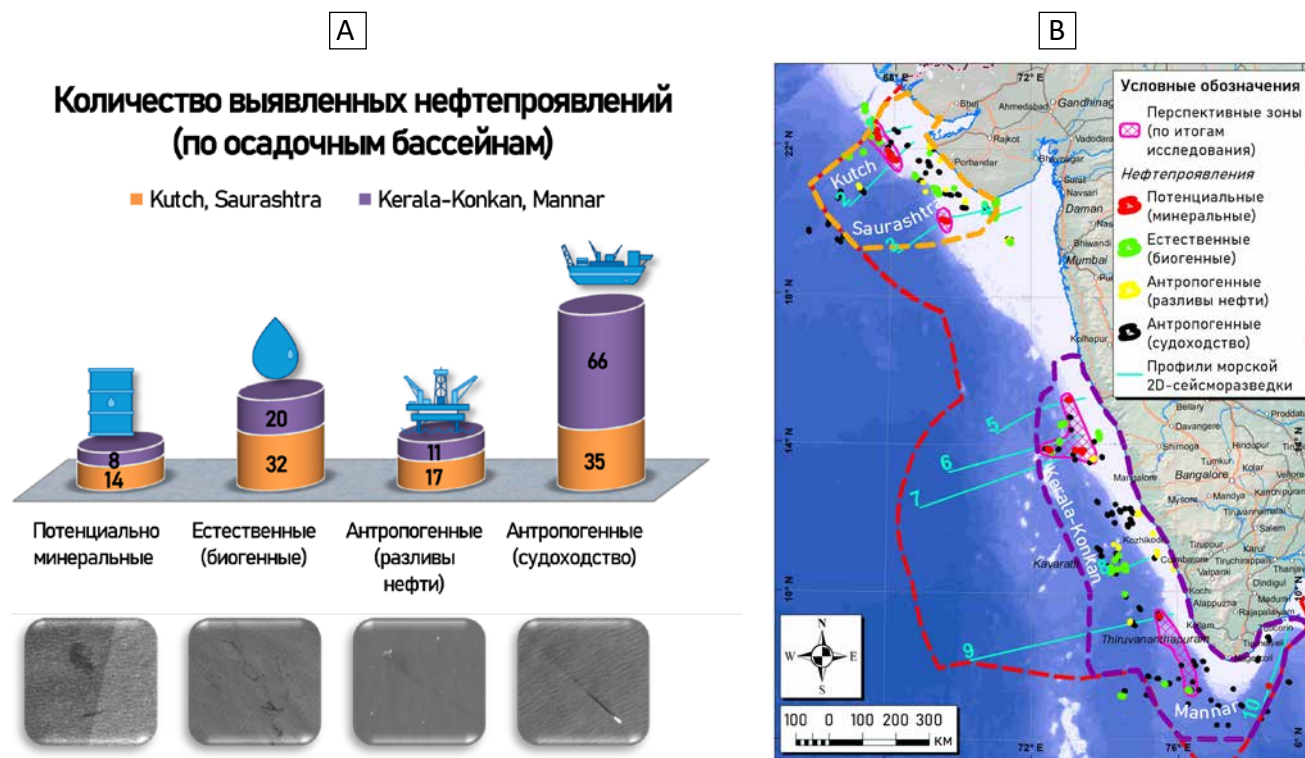


Рис. 8. Результаты исследования: А — диаграмма «Количество выявленных нефтепроявлений по осадочным бассейнам», В — итоговая карта расположения нефтепроявлений на западной континентальной окраине полуострова Индостан (по состоянию на март-апрель 2022 года)

Fig. 8. Research results: A — "Number of identified oil seepages by sedimentary basin" diagram, B — final map of oil seepages location on the Western Continental Margin of the Indian subcontinent (as of March-April 2022)



чаще всего обнаруживаются в окраинных морях активных континентальных окраин и в зонах перехода континент-океан [6], являются своеобразными индикаторами нефтегазоносных систем и газогидратных скоплений, что также является косвенным показателем минерального происхождения обнаруженных потенциальных нефтепроявлений. Имеющиеся для этого района данные цифровой модели морского дна открытого пользования недостаточно точны для обнаружения таких морфологических объектов, связанных с поверхностными выходами нефти и газа. Поэтому для дальнейшего изучения выявленного перспективного района рекомендуется провести высокоточную батиметрическую съемку с помощью судна с гидролокатором бокового обзора для поиска и изучения потенциальных скоплений и подводных морфологических объектов на окраинах шельфа, а также выполнить геохимический анализ проб воды.

Результаты текущего исследования не в последнюю очередь были использованы при подготовке очередного раунда аукциона за право приобретения в недропользование новых лицензионных блоков Open Acreage Licensed Policy (OALP) в пределах морской части осадочных бассейнов Kutch и Saurashtra. При сопоставлении границ предлагаемых участков по данным DGH [25] с результатами текущего ис-

следования (рис. 9) видно, что большая часть минеральных и биогенных нефтепроявлений охвачена новыми лицензионными участками, в рамках которых предлагается выполнить поисково-оценочный этап ГРП.

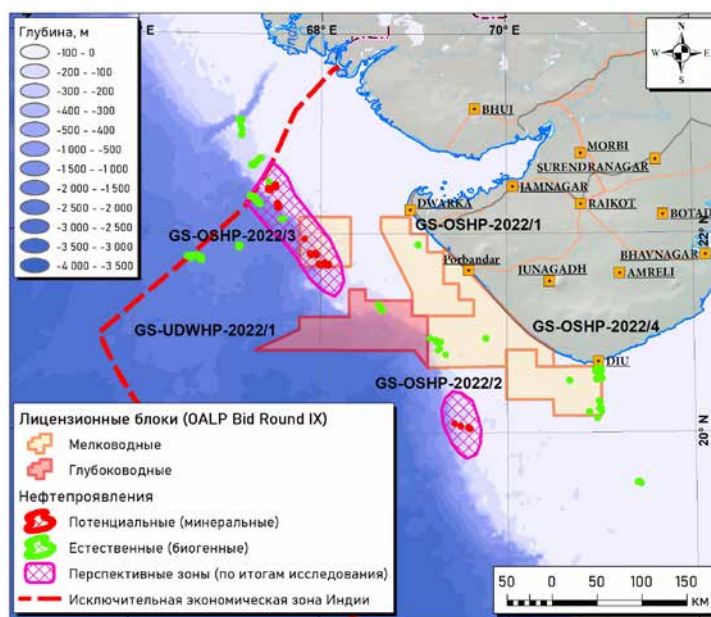
### Выводы

Данные дистанционные зондирования Земли обладают высоким потенциалом обнаружения нефтяных пятен, вызванных различными факторами. Однако определение происхождения того или иного объекта только по данным ДЗЗ без привлечения других геоданных является достаточно трудной задачей, особенно в условиях высокой навигационной активности.

Разработанная методика комплексного анализа спутниковых, геофизических и иных геоданных направлена на повышение достоверности визуального дешифрирования и классификации нефтепроявлений по их происхождению. Результаты апробации на примере западного побережья полуострова Индостан позволяют говорить о высокой эффективности методики выделения естественных нефтяных пятен минерального происхождения в районах интенсивного судоходства. Использование материалов морской сейсморазведки при обнаружении резервуаров потенциального накопления углеводородов и путей их миграции в верхний слой

**Рис. 9.** Сопоставление результатов исследования с границами лицензионных участков, предлагаемых к недропользованию в рамках OALP Bid Round IX

Fig. 9. Comparison of the research results with the boundaries of licence areas proposed for subsoil use under OALP Bid Round IX



акваторий в виде разрывных нарушений и трещин в сочетании с использованием открытых источников метеорологической, геологической и другой информации способствует повышению достоверности классификации нефтяных пятен, обнаруженных визуальным методом дешифрирования данных ДЗЗ.

Полученные результаты могут иметь большое значение для экологического мониторинга нефтяного загрязнения Мирового океана, для обеспече-

ния безопасности инженерных сооружений нефтегазового комплекса при последующей активной разработке действующих морских месторождений и выявления новых месторождений на западном побережье полуострова Индостан. Разработанная методика может быть использована при определении перспектив нефтегазоносности в других глубоководных бассейнах Индии, а также на шельфе России и других стран мира.

#### Список источников

1. Бекмухамедов Б.Э., Балакай Л.А., Каипов И.В. Мониторинг нефтяных загрязнений на акватории Каспийского моря методами дистанционного зондирования // Гидрометеорология и экология. – 2016. – № 2 (81). – С. 114–124.
2. Гулиев А.Ш., Хлебникова Т.А. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории Нефтяных Камней (Каспий)) // Вестник СГУГИТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 52–64. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64.
3. Деева Ю.В., Алпысбай М.А., Калдыбаев А.А., Гаврук С.В. Метод детектирования нефтяных пятен с помощью мультиспектральных космических снимков // Вестник Казахского национального университета. Серия географическая. – 2018. – № 4 (51). – С. 75–82.
4. Зотягалова В.В. Разработка методики и технологии геоинформационного анализа спутниковых радиолокационных изображений для экологического мониторинга морской поверхности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук – М.: МИИГАиК, 2012. – 24 с.
5. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Либина Н.В. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокационной съемки // Исследование Земли из космоса. – 2020. – № 5. – С. 43–62. DOI: 10.31857/S0205961420050061.
6. Макаров Д.В., Холмогоров А.О., Шакиров Р.Б. Влияние покмарков на распространение низкочастотного звука в мелком море // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 4(38). – С. 60–71. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_06.
7. Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 130–149.
8. Bastia R., Radhakrishna M. Subsurface Geology, Depositional History, and Petroleum Systems Along the Western Offshore Basins of India // Bastia R., Radhakrishna M. Basin Evolution and Petroleum Prospectivity of the Continental Margins of India. – Amsterdam; Oxford: Elsevier, 2012. – pp. 269–317. DOI: 10.1016/b978-0-444-53604-4.00006-5.
9. Dave H.D., Mazumder S., Samal J.K., Pangtey K.K.S., Mitra D.S. Detection of natural hydrocarbon seepages using SAR technology and associated subsurface studies in offshore Mahanadi Basin for delineation of possible areas of hydrocarbon exploration [Электронный ре-

сурс] / The 2nd South Asian Geoscience Conference and Exhibition, GEOIndia2011 (12-14 января 2011 г., Большая Нойда, Нью-Дели, Индия). – 2011. – 7 р. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/296614232\\_Detection\\_of\\_Natural\\_Hydrocarbon\\_Seepages\\_Using\\_SAR\\_Technology\\_and\\_Associated\\_Subsurface\\_Studies\\_in\\_Offshore\\_Mahanadi\\_Basin\\_for\\_Delineation\\_of\\_Possible\\_Areas\\_of\\_Hydrocarbon\\_Exploration](https://www.researchgate.net/publication/296614232_Detection_of_Natural_Hydrocarbon_Seepages_Using_SAR_Technology_and_Associated_Subsurface_Studies_in_Offshore_Mahanadi_Basin_for_Delineation_of_Possible_Areas_of_Hydrocarbon_Exploration) (дата обращения: 19.01.2024).

10. *Earth Explorer* [Электронный ресурс] / United States Geological Survey. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 30.03.2022).

11. *Enna A., Benoit A., Bolon P., Mieghebielle V., Conche B., Oppenheim G.* Offshore Oil Slicks Detection From SAR Images Through The Mask-RCNN Deep Learning Model // 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (19-24 июля 2020 г., Глазго, Великобритания). – 2020. – 8 р. DOI: 10.1109/ijcnn48605.2020.9206652.

12. *GEBCO\_2020 Grid* [Электронный ресурс] / General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre. – Режим доступа: [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/gebco\\_2020/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2020/) (дата обращения: 19.01.2024).

13. *Hu C., Lu Y., Sun S., Liu Y.* Optical Remote Sensing of Oil Spills in the Ocean: What Is Really Possible? // *Journal of Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 2021. – Art. ID 9141902. DOI: 10.34133/2021/9141902.

14. *India's hydrocarbon outlook. A report on exploration & production activities 2022-2023* [Электронный ресурс] / Directorate General of Hydrocarbons. – Режим доступа: <https://dghindia.gov.in/assets/downloads/ar/2022-23.pdf> (дата обращения: 19.01.2024).

15. *Indian Geology. Basins and Categories* [Электронный ресурс] / Directorate General of Hydrocarbons. – Режим доступа: <https://dghindia.gov.in/index.php/page?pagelid=66&name=Indian%20Geology> (дата обращения: 19.01.2024).

16. *Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G.* Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives and challenges // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – № 2. – 181. DOI: 10.3390/jmse9020181.

17. *Map Series* [Электронный ресурс] / Geological Survey of India. – Режим доступа: [https://www.gsi.gov.in/webcenter/portal/OCBIS/pages\\_pageMAPS/pageMapsSeries](https://www.gsi.gov.in/webcenter/portal/OCBIS/pages_pageMAPS/pageMapsSeries) (дата обращения: 19.01.2024).

18. *Marine traffic* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marinetraffic.com/> (дата обращения: 19.01.2024).

19. *Meteoblue. Weather close to you* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.meteoblue.com/> (дата обращения: 19.01.2024).

20. *Mitra D.S., Majumdar T.J., Ramakrishnan R., Dave H., Mazumder S.* Detection and monitoring of offshore oil seeps using ERS/ENVISAT SAR/ASAR data and seep-seismic studies in Krishna–Godavari offshore basin, India // *Geocarto International*. – 2012. – Vol. 28. – Iss. 5. – pp. 404–419. DOI: 10.1080/10106049.2012.715207.

21. *Mohr V., Gade M.* Marine oil pollution in an area of high economic use: Statistical Analyses of SAR data from the western Java Sea // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – Iss. 4. – 880. DOI: 10.3390/rs14040880.

22. *Pandey D.K., Nair N., Kumar A.* The western continental margin of India: Indian scientific contributions (2016-2018) // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. – 2020. – Vol. 86. – No. 1. – pp. 331–341. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49789.

23. *Saha K.K., Sengupta S.* Feasibility study of offshore oil seepage detection using SAR technology [неопубликованный отчет] / Keshava Deva Malaviya Institute of Petroleum Exploration, Remote sensing and Geomatics Lab. – 2007. – 60 p.

24. *Shankar U., Ojha M., Sain K., Khanna R., Sudhakar M., Tyagi A.* Seafloor geophysical study in search of gas hydrates/gas related evidences in the deep waters of the western continental margin of India // *Journal Geological Society of India*. – 2008. – Vol. 72. – pp. 547–555. DOI: 0016-7622/2008-72-4-547.

25. *Vijaya Kumar L.J., Kishore J.K., Kesava Rao P., Annadurai M., Dutt C.B.S., Hanumantha Rao K., Sasamal S.K., Arulraj M., Prasad A.V.V., Sita Kumari E.V.S., Satyanarayana S.N., Shenoy H.P.* Oil spill map for Indian Sea region based on Bhuvan-Geographic Information System using satellite images // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2014. – Vol. XL-8. – pp. 1085–1090. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-8-1085-2014.

## References

1. *Bekmukhamedov B.E., Balakay L.A., Kaipov I.V.* Remote sensing monitoring of oil spills on the water surface of the Caspian Sea. *Hydrometeorology and Ecology*. 2016;(2):114–124.

2. *Guliev A.Sh., Khlebnikova T.A.* Revealing oil pollution spots on shelf zone with help of space survey (on the example of Oil Stones water area, Caspian Sea). *Vestnik of SSUGT*. 2019;24(3):52–64. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64.

3. *Deeva Yu.V., Alpysbay M.A., Kaldybaev A.A., Gavruk S.V.* Method for detecting oil spots on the sea surface by means of multispectral satellite imagery. *Journal of Geography and Environmental Management*. 2018;(4):75–81.

4. *Zatyagalova V.V.* Razrabotka metodiki i tekhnologii geoinformatsionnogo analiza sputnikovykh radiolokatsionnykh izobrazhenii dlya ehkologicheskogo monitoringa morskoi poverkhnosti [Development of methodology and technology for geoinformation analysis of satellite radar images for environmental monitoring of the sea surface]. Extended abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow: MIIGAIK; 2012. 24 p.

5. *Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Terleeva N.V., Libina N.V.* Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020;(5):43–62. DOI: 10.31857/S0205961420050061. [In Russian]

6. *Makarov D.V., Kholmogorov A.O., Shakirov R.B.* Influence of pockmarks on propagation of low-frequency sound in a shallow sea. *Underwater investigations and robotics*. 2021;(4):60–71. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_06.

7. *Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu.* Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015;12(5):130–149.

8. *Bastia R., Radhakrishna M.* Subsurface Geology, Depositional History, and Petroleum Systems Along the Western Offshore Basins of India. In: *Bastia R., Radhakrishna M. Basin Evolution and Petroleum Prospectivity of the Continental Margins of India*. Amsterdam; Oxford : Elsevier; 2012. pp. 269–317. DOI: 10.1016/b978-0-444-53604-4.00006-5.

9. *Dave H.D., Mazumder S., Samal J.K., Pangtey K.K.S., Mitra D.S.* Detection of natural hydrocarbon seepages using SAR technology and associated subsurface studies in offshore Mahanadi Basin for delineation of possible areas of hydrocarbon exploration. The 2nd South Asian Geoscience Conference and Exhibition, GEOIndia2011 (12-14 January 2011, Greater Noida, New Delhi, India). 2011. 7 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/296614232\\_Detection\\_of\\_Natural\\_Hydrocarbon\\_Seepages\\_Using\\_SAR\\_Technology\\_and\\_Associated\\_Subsurface\\_Studies\\_in\\_Offshore\\_Mahanadi\\_Basin\\_for\\_Delineation\\_of\\_Possible\\_Areas\\_of\\_Hydrocarbon\\_Exploration](https://www.researchgate.net/publication/296614232_Detection_of_Natural_Hydrocarbon_Seepages_Using_SAR_Technology_and_Associated_Subsurface_Studies_in_Offshore_Mahanadi_Basin_for_Delineation_of_Possible_Areas_of_Hydrocarbon_Exploration)

- net/publication/296614232\_Detection\_of\_Natural\_Hydrocarbon\_Seepages\_Using\_SAR\_Technology\_and\_Associated\_Subsurface\_Studies\_in\_Offshore\_Mahanadi\_Basin\_for\_Delineation\_of\_Possible\_Areas\_of\_Hydrocarbon\_Exploration (accessed 19.01.2024).
10. *Earth Explorer*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 30.03.2022).
  11. *Emna A., Benoit A., Bolon P., Miegebielle V., Conche B., Oppenheim G.* Offshore Oil Slicks Detection From SAR Images Through The Mask-RCNN Deep Learning Model. In: 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) ( 19-24 July 2020, Glasgow, UK). 2020. 8 p. DOI: 10.1109/ijcnn48605.2020.9206652.
  12. *GEBCO\_2020* Grid. Available at: [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/gebco\\_2020/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2020/) (accessed 19.01.2024).
  13. *Hu C., Lu Y., Sun S., Liu Y.* Optical Remote Sensing of Oil Spills in the Ocean: What Is Really Possible? *Journal of Remote Sensing*. 2021;2021:9141902. DOI: 10.34133/2021/9141902.
  14. *India's hydrocarbon outlook. A report on exploration & production activities 2022-2023.* Available at: <https://dghindia.gov.in/assets/downloads/ar/2022-23.pdf> (accessed 19.01.2024).
  15. *Indian Geology. Basins and Categories.* Available at: <https://dghindia.gov.in/index.php/page?pagelid=66&name=Indian%20Geology> (accessed 19.01.2024).
  16. *Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G.* Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives and Challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(2):181. DOI: 10.3390/jmse9020181.
  17. *Map Series.* – Available at: [https://www.gsi.gov.in/webcenter/portal/OCBIS/pages\\_pageMAPS/pageMapsSeries](https://www.gsi.gov.in/webcenter/portal/OCBIS/pages_pageMAPS/pageMapsSeries) (accessed 19.01.2024).
  18. *Marine traffic.* Available at: <https://www.marinetraffic.com/> (accessed 19.01.2024).
  19. *Meteoblue.* Weather close to you. Available at: <https://www.meteoblue.com/> (accessed 19.01.2024).
  20. *Mitra D.S., Majumdar T.J., Ramakrishnan R., Dave H., Mazumder S.* Detection and monitoring of offshore oil seeps using ERS/ENVISAT SAR/ASAR data and seep-seismic studies in Krishna–Godavari offshore basin, India. *Geocarto International*. 2012;28(5):404-419. DOI: 10.1080/10106049.2012.715207.
  21. *Mohr V., Gade M.* Marine Oil Pollution in an Area of High Economic Use: Statistical Analyses of SAR Data from the Western Java Sea. *Remote Sensing*. 2022;14(4):880. DOI: 10.3390/rs14040880.
  22. *Pandey D., Nair N., Kumar A.* The western continental margin of India: Indian scientific contributions (2016-2018). *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2020;86(1):331–341. DOI: 10.16943/ptinsa/2020/49789.
  23. *Saha K.K., Sengupta S.* Feasibility study of offshore oil seepage detection using SAR technology [unpublished report]. Keshava Deva Malaviya Institute of Petroleum Exploration, Remote sensing and Geomatics Lab. 2007. 60 p.
  24. *Shankar U., Ojha M., Sain K., Khanna R., Sudhakar M., Tyagi A.* Seafloor Geophysical Study in Search of Gas Hydrates/Gas Related Evidences in the Deep Waters of the Western Continental Margin of India. *Journal Geological Society of India*. 2008;72:547–555. DOI: 0016-7622/2008-72-4-547.
  25. *Vijaya Kumar L.J., Kishore J.K., Kesava Rao P., Annadurai M., Dutt C.B.S., Hanumantha Rao K., Sasamal S.K., Arulraj M., Prasad A.V.V., Sita Kumari E.V.S., Satyanarayana S.N., Shenoy H.P.* Oil Spill Map for Indian Sea Region based on Bhuvan-Geographic Information System using Satellite Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014;XL-8:1085–1090. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-8-1085-2014.

Статья поступила в редакцию 06.07.2023, одобрена после рецензирования 08.09.2023, принята к публикации 10.01.2024.  
The article was submitted 06.07.2023; approved after reviewing 08.09.2023; accepted for publication 10.01.2024.

### Информация об авторе

#### Логинов Дмитрий Сергеевич

Кандидат технических наук

Ведущий ГИС-специалист

ООО «Целевой Горизонт»

123308 Москва, 3-я Хорошёвская ул., д. 2, с.1

e-mail: loginov@cartlab.ru

ORCID ID: 0000-0003-0853-1757

SCOPUS ID: 57194408117

ResearcherID: S-4977-2016

SPIN: 5535-6262

### Information about author

Dmitriy S. Loginov

Candidate of Technical Sciences

Leading GIS specialist

Limited liability company "Tselevoi Gorizont"

2(1), 3-ya Khoroshevskaya st., Moscow, 123308, Russia

e-mail: loginov@cartlab.ru

ORCID ID: 0000-0003-0853-1757

SCOPUS ID: 57194408117

ResearcherID: S-4977-2016

SPIN: 5535-6262