

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ И ИХ ПОДВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2022 г. Е. Р. Матросова<sup>а, \*</sup>, В. Н. Ходаева<sup>а</sup>, А. Ю. Иванов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: [ekaterina.r.matrosova@gmail.com](mailto:ekaterina.r.matrosova@gmail.com)

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

Рассматриваются и систематизируются основные значимые параметры естественных нефтепроявлений и возможности их определения по данным космической радиолокации и оптической съемки. Показано, что анализ временных серий оптических и радиолокационных изображений позволяет определить основные/характерные параметры естественных нефтепроявлений, с помощью которых становится возможным узнать местоположение их подводных источников, интенсивность и объемы выбросов, геолого-геофизическое состояние и в некоторой степени перспективы нефтегазоносности региона. Обсуждаются возможности, ограничения и перспективы использования данных ДЗЗ для рассматриваемых задач. Обзорный характер работы позволил рассмотреть современные методы и результаты исследований естественных нефтепроявлений с помощью данных дистанционного зондирования.

*Ключевые слова:* естественные нефтепроявления, морская поверхность, дистанционное зондирование, космическая радиолокация, оптические снимки, нефтегазоносность

**DOI:** 10.31857/S0205961422020063

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акватории морей и океанов подвергаются интенсивным негативным антропогенным (Бондур, 2010; Бондур и др., 2012) и естественным (Бондур, Кузнецова, 2015; Kvenvolden, Cooper, 2003) воздействиям, в том числе загрязнением нефтью. Для решения проблем поиска и разведки месторождений нефти необходимо выявлять естественные нефтепроявления (ЕН). ЕН представляют собой пленочные образования на морской поверхности, возникающие в результате высачиваний углеводородов (УВ) на морское дно и последующего поступления их на поверхность (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2012). Выходы природных УВ важны для учета в глобальном балансе углеродного цикла, контроля загрязнений морской среды и состояния морских экосистем (Бондур, 2010, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012, 2015). Основываясь на мировых оценках (Kvenvolden, Cooper, 2003), около 47% или более сырой нефти поступает в морскую среду только из-за природных просачиваний нефти.

Высачивания нефти происходят за счет миграции нефтеуглеводородов (НУ) из областей повышенного пластового давления (ПД) в области пониженного ПД по проницаемым породам или

тектоническим нарушениям (Гаврилов, 2012). Такие высачивания наблюдаются в районах распространения различных подводных источников (эруптивных структур морского дна), через которые нефть поступает на морское дно. Подводные источники НУ распространены в Мировом океане от побережий до глубоководных районов в самых разных геологических зонах. Скрытые водами морей и океанов, их количество исчисляется тысячами, и они многообразны по своему происхождению и структуре (Kvenvolden, Cooper, 2003; Холодов, 2012; Шнюков и др., 2017). Их также называют сипами – областями разгрузки жидких и газообразных углеводородов, к которым относятся грязевые вулканы, грифоны, сальзы и т.п. флюидовыводящие или эруптивные структуры на дне моря в местах сосуществования нефтегазовых залежей и сетей разломов (Link, 1952; Etiope, 2015). Так, согласно (Лимонов, 2004; Бондур, Кузнецова, 2015), подводные источники исследуются с точки зрения нефтегазоносности, а также как природное явление, в том числе, опасное, которое должно учитываться при проектировании морских сооружений нефтегазового комплекса.

К основным процессам, влияющим на активность подводных источников, и соответственно на высачивания нефти, относят сейсмические и

тектонические процессы (землетрясения, процессы сжатия и т.д.) (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2012, 2015). Данную взаимосвязь продемонстрировали ряд исследований, например, в (Geersen et al., 2016) установлено, что сильное землетрясение Мауле в 2010 г. вызвало выходы газа у побережья Чили. В свою очередь утверждается, что просачивания могут возникать как во время, так и после землетрясений, а также перед ними, выступая при этом предвестниками землетрясений (Vasilev et al., 2021).

Важным наблюдением также является взаимосвязь просачиваний нефти и расположения нефтегазоносных регионов (Бондур, Кузнецова, 2012; Иванов и др., 2020). В связи с этим ЕН рассматривают в качестве индикаторов перспективной нефтегазоносности (Аэрокосмический..., 2012).

Исследование ЕН, их подводных источников, сейсмической и тектонической обстановки, а также нефтегазоносности региона возможно благодаря поступившим на морскую поверхность в результате просачиваний пятнам нефти (или ЕН), видимых визуально и инструментально (Иванов и др., 2020). Регистрация ЕН может проводиться с использованием космических (Бондур, 2010; Иванов, 2007; Аэрокосмический..., 2012; Bondur, 2005, 2011) и подспутниковых методов (Бондур и др., 2007; Keeler et al., 2004), а также путем их комплексирования (Bondur, 2005; Bondur, Tsidilina, 2005; Bondur, Zamshin, 2018). Кроме этого, могут использоваться методы математического моделирования (Бондур и др., 2006; Bondur, 2011). Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют регистрировать такие пятна нефти, плавающие на поверхности моря, и определять их характеристики (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012).

Хорошо известно, что пленки нефти подавляют мелкие гравитационно-капиллярные волны, создают области выглаживания (слики) на поверхности моря, изменяя пространственные спектры поверхностного волнения (Bondur, 2005, 2011), вызывают различия спектральных яркостей в местах нефтепроявлений по сравнению с фоном (Бондур, Зубков, 2005; Pugach et al., 2018), уменьшают обратное рассеяние в сторону антенны космического аппарата и соответственно формируют темные пятна на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности (Иванов, 2007; Бондур, 2010). Благодаря этому в настоящее время исследование ЕН возможно с использованием подходов и методов дистанционного зондирования. Данные ДЗЗ обладают рядом преимуществ, которые позволяют решать задачу изучения ЕН, среди них: большая обзорность, возможность проведения исследований в удаленных районах, получение информации с различным пространственным и временным разрешением, глобаль-

ное покрытие, регулярность, оперативность получения данных и ряд других преимуществ (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012; Bondur 2005, 2011).

Для наблюдения, мониторинга и изучения нефтепроявлений в настоящее время используют данные радиолокационных (РЛ) спутников Sentinel-1 (Sentinel-1A – на орбите; Sentinel-1C и Sentinel-1D планируются) и оптических спутников Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat-8, которые находятся в свободном доступе, а также при необходимости данные коммерческих РЛ-спутников высокого разрешения Radarsat, TerraSAR-X, PAZ, ICEYE и др. Современная спутниковая система мониторинга, помимо оперативности, доступности и всепогодности, независима от других методов наблюдений (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012). При проведении мониторинга ЕН важно исследовать фоновые характеристики водной среды, в том числе поля скоростей течений (Бондур и др., 2012), приливные явления (Бондур и др., 2007, 2008), характеристики волновых процессов (Бондур и др., 2009) и др.

В настоящей работе подробно рассматриваются основные значимые параметры ЕН, которые можно извлечь из данных ДЗЗ (оптических и радиолокационных), обсуждаются методы и подходы для наблюдения и исследования ЕН, а также анализируется связь ЕН с эруптивными формами морского дна, сейсмичностью, тектоникой, грязевым вулканизмом и нефтегазоносностью. Работа носит обзорный характер, но при этом содержит оригинальные результаты анализа данных ДЗЗ. Обсуждаются также возможности, ограничения и перспективы применения ДЗЗ для рассматриваемых задач.

## ОСОБЕННОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ

Нефть, попадающая на морскую поверхность в результате естественного высачивания или выхода жидких НУ из источников на дне моря, прежде чем достигнуть поверхности, участвует в ряде процессов, среди которых: 1) накопление НУ в пласте-коллекторе или ловушке в геологических временных масштабах; 2) миграция НУ внутри пласта и через перекрывающий слой на морское дно; 3) вертикальный перенос НУ через водную толщу на морскую поверхность (Aminzadeh et al., 2013; Leifer, 2019).

На процессы накопления, миграции и просачивания НУ на морское дно воздействуют многочисленные глубинные геологические факторы: тип отложений, состав флюидов, характер разломов, солевые структуры, стратиграфия, ПД и температура. Вертикальный перенос НУ к поверхности моря определяется влиянием следующих до-

полнительных факторов: состав НУ, глубина моря в месте просачиваний, процессы в водной толще, течения и волнение на поверхности. Соответственно, некоторые жидкие НУ могут остаться на морском дне, другие — достигнуть морской поверхности (Aminzadeh et al., 2013).

Достигнув поверхности моря, жидкий компонент — нефть образует пятна-слики — нефтепроявления различной формы и размеров, которые видоизменяют (выглаживают) ветровое мелкомасштабное волнение и видоизменяются сами под действием различных физико-химических процессов (растекание, дрейф, дисперсия, испарение, эмульгирование, растворение, окисление), истончаются и постепенно исчезают (ИТОРФ, 2015; Патин, 2017).

К значимым параметрам ЕН, на основе которых их можно отличить от пятен прочих нефтезагрязнений относят форму и размеры, направление дрейфа, время жизни, частоту появления, толщину пленки, приуроченность к районам распространения эруптивных структур, сейсмически-активным и нефтегазоносным регионам (Иванов и др., 2007; Гасанов и др., 2005; Алиев, 2006; Бондур, 2012). Например, известно, что нефтепроявления, многократно наблюдаемые в одном месте, являются надежным признаком постоянной подпитки из источников на дне и считаются их поверхностным проявлением (Иванов, 2007; Бондур, Замшин, 2012; Затягалова, 2012). В свою очередь, периодичность появления ЕН отражает чередование импульсов интенсивной работы источников на дне с периодами спокойной разгрузки флюидов (Бондур, Кузнецова, 2012).

Таким образом, изучение ЕН и определение их параметров может дать полезную информацию как о них самих, так и об их источниках на дне, а также путях миграции УВ (Бондур, 2010, 2012; Иванов и др., 2007, 2015; Aminzadeh et al., 2013).

#### ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЗЗ

Изучению ЕН с помощью данных ДЗЗ посвящена обширная литература, в том числе российских авторов (см.: Бондур, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Евтушенко, Иванов, 2012; Иванов, 2019; Иванов и др., 2007, 2015, 2020; Лаврова и др., 2011; Митягина, 2018; Сизов и др., 2020; Ivanov, Gerivani, 2020; Ivanov, Mogočić, 2020; Ivanov et al., 2020; Клименко и др., 2022). В настоящее время применяют различные подходы и методы для изучения ЕН, отображающихся на космических изображениях.

Среди дистанционных методов изучения ЕН часто используются радиолокационные и оптические методы. На РЛИ пленки ЕН формируют

области пониженного рассеяния (темные области на фоне морской поверхности) в результате выглаживания мелкомасштабного поверхностного волнения. Данные области служат предварительными индикаторами нефтепроявления. При слабом ветре (1–2 м/с) наблюдаются неблагоприятные условия для обнаружения и идентификации нефтяных пятен из-за низких значений удельной эффективной площади рассеяния поверхности моря. В таких случаях отмечается высокая вероятность появления ложных тревог — сликов биогенного и аэрогидродинамического происхождения из-за значительной изменчивости ветра у поверхности моря. При сильном ветре (>7 м/с) на морской поверхности остаются только пятна тяжелой нефти или нефтепродуктов, но при дальнейшем увеличении скорости ветра, как правило, слики исчезают с поверхности моря (Иванов, 2007).

Таким образом, для РЛ-обнаружения и распознавания нефтяных сликов естественного происхождения среди сликов иной природы важно учитывать гидрометеорологические условия (ГМУ), в частности скорость ветра (оптимальным признан диапазон скоростей ветра 3–7 м/с), которая выступает своеобразным фильтром (Иванов, 2007).

Для определения параметров ЕН, таких как толщина пленки и объем выбросов используют пассивные методы ДЗЗ, к которым относят оптические методы. Дистанционное зондирование в видимом диапазоне основано на наблюдении яркости рассеянного и отраженного океаном солнечного света. Падающее солнечное излучение частично отражается водной поверхностью, верхним слоем моря, взвешенными в нем частицами и морским дном. Отражательные свойства морской поверхности определяются рядом оптических характеристик, включая спектральный и интегральный коэффициенты яркости, спектральное и интегральное альbedo и контраст. В свою очередь, нефтепроявления (пленки нефти) влияют на составляющую яркости, обусловленную отражением от морской поверхности, так как отражательная способность нефти выше, чем окружающей морской воды. Оптические свойства нефтяной пленки на поверхности моря изменяются в зависимости от ее толщины (Бондур, 2010, 2012; Лаврова и др., 2011; Fingas, 2018).

Нефтяные пятна естественного происхождения часто имеют так называемую точку всплытия или кляксообразные утолщения, где всплывшая нефть некоторое время аккумулируется на поверхности моря. Как тонкие пленки, они достаточно хорошо отслеживают поле преобладающих течений. Только в редких случаях на дне имеются одиночные источники. Часто источники располагаются группами, а более крупные из них

осложнены второстепенными – грифонами и сальзами, – в результате чего на морской поверхности образуются хорошо выраженные кластеры подобных по форме пятен. Форма и размеры пятен достаточно характерны: это длинные (иногда десятки километров) линейчатые образования, нередко имеющие форму запятых, меандров, зигзагов или даже петель (рис. 1); только что всплывшая нефть имеет форму округлых пятен небольшой площади. Время существования на морской поверхности обычно составляет от нескольких часов до суток и более, что зависит от ГМУ (Daneshgar Asl et al., 2017). В связи с естественным происхождением эти пятна привязаны к известным районам нефтегазонакопления или сосредоточения на дне грязевых вулканов, грифонов, сипов, которые источают НУ (Иванов и др., 2007; Бондур, Кузнецова, 2012).

С целью повышения вероятности обнаружения ЕН используют геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затягало, 2007). ГИС-подход основан на интеграции в ГИС среде всей доступной информации, в частности данных ДЗЗ, физико-географической информации о водном бассейне, структуре морского нефтегазового комплекса, данных автоматических систем идентификации судов – АИС и др. Тематические ГИС способствуют повышению качества идентификации пятен нефтепроявлений, определения характеристик их пространственного распределения и выявления мест их концентрации. Кроме того, ГИС-подход позволяет извлечь информацию о местоположении (выявляется практически автоматически по мере накопления данных), о линейных размерах и площадях нефтяных пятен, т.е. определить основные характеристики нефтепроявлений, а иногда и оценить их активность по частоте появления пятен на поверхности моря (Иванов и др., 2007).

Благодаря появлению численных методов стало возможным моделирование распространения нефтяных пятен. Преимущество совместного использования данных ДЗЗ, гидрометеорологической и океанологической информации и результатов численного моделирования состоит в том, что все это позволяет проследить трансформацию пятна, обнаруженного, например, на РЛИ, во времени и пространстве, а также определить его дрейф до момента исчезновения (Овсиенко и др., 2005; Становой и др., 2007; Liungman, Mattson, 2011).

Поэтому, если известны характеристики нефти, параметры разлива и условия окружающей среды (ветер, течения, волнение, температура поверхности моря и др.), то моделирование основных гидродинамических процессов и дрейфа не представляет затруднений (Klemas, 2010; Daneshgar Asl et al., 2017). С другой стороны, процессы биохимического выветривания нефти известны с неко-

торой степенью достоверности и могут быть лишь описаны эмпирическими моделями, которые часто основаны на лабораторных результатах или небольшом количестве тестирований в море, что создает погрешности.

## ПАРАМЕТРЫ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ, ОЦЕНКИ КОТОРЫХ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ С ПОМОЩЬЮ ДЗЗ

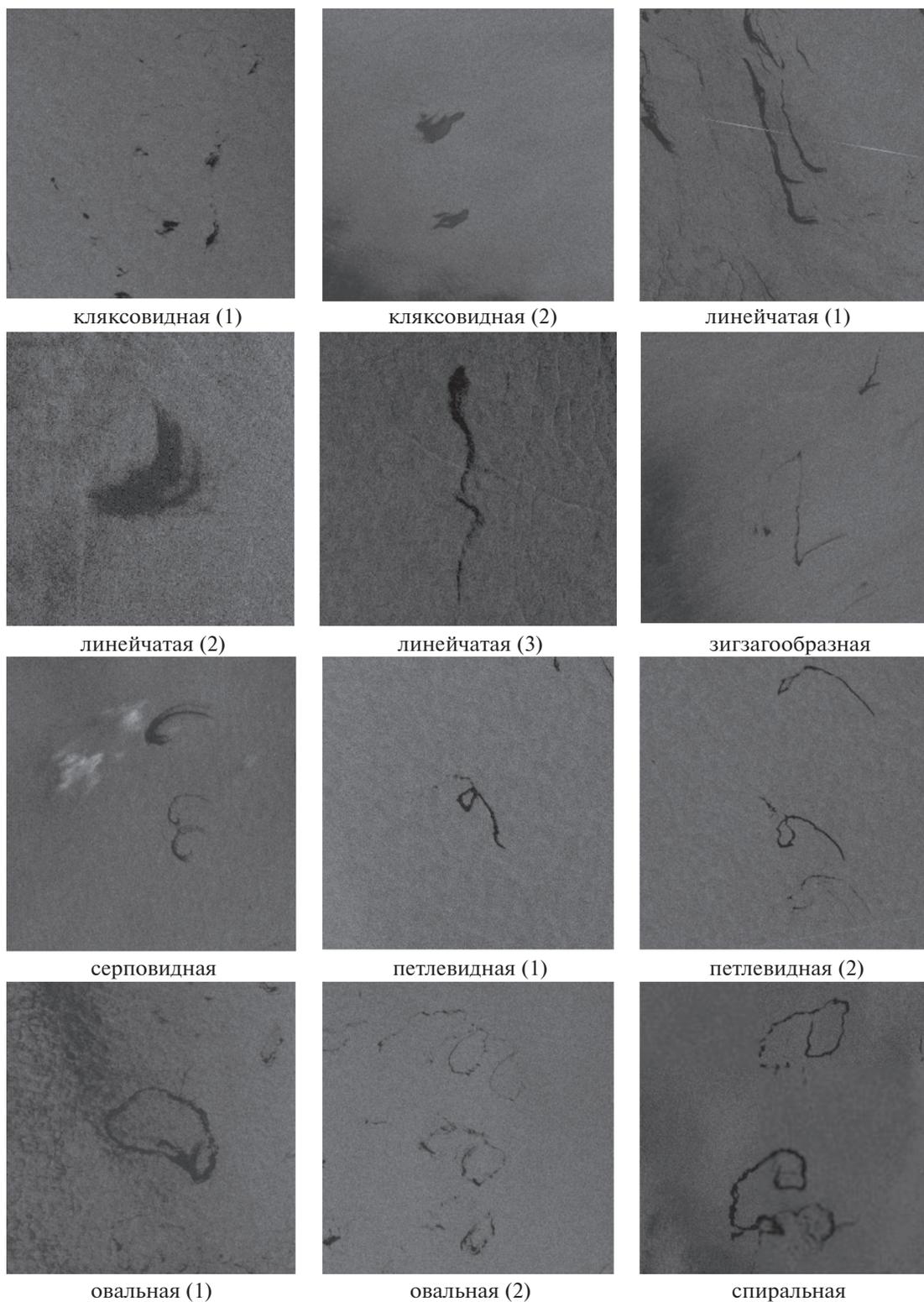
### *Форма и размеры*

Пленки ЕН на морской поверхности в целом имеют линейчатую форму, но нередко проявляются в виде точечных (круглых), серповидных, подковообразных, петлеобразных и спиралевидных структур относительно небольших размеров (Иванов и др., 2007). Их видимая форма обусловлена динамикой верхнего слоя моря. Это, в первую очередь, переменчивые течения у поверхности, которые часто меняют свое направление в зависимости от преобладающего ветра. В зависимости от ГМУ и времени нахождения на поверхности нефтепроявления имеют различные формы и размеры. Например, только что всплывшая нефть имеет форму округлых пятен небольшой площади. Со временем она подвергается воздействию ветра и течений и приобретает форму длинных вытянутых сликов. Кольцевая, петлеобразная и спиральная формы пятен (рис. 1) – результат вовлечения пленок в локальные вихревые структуры (Иванов и др., 2007).

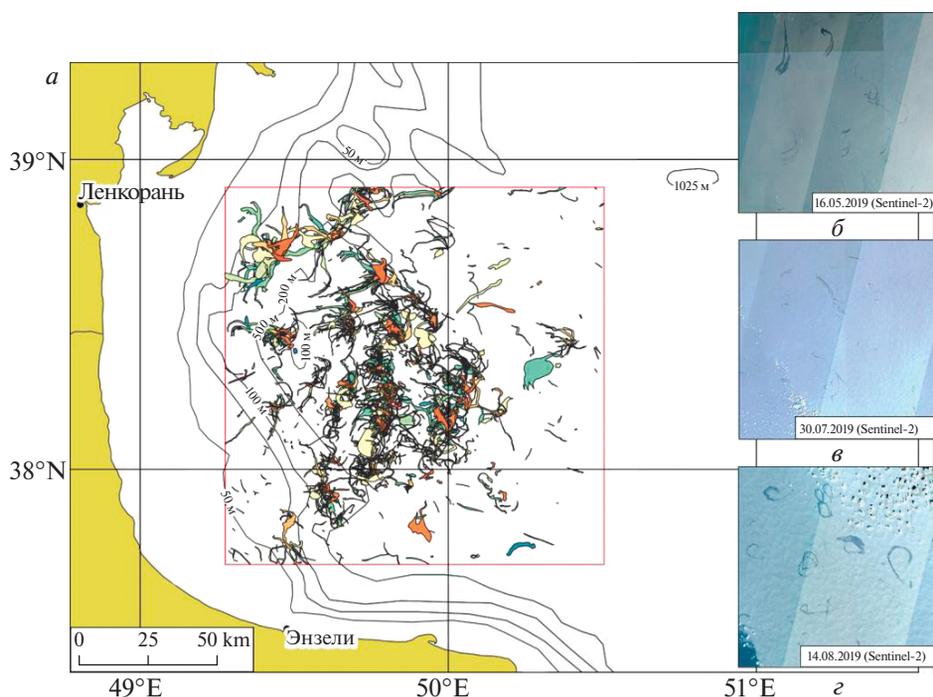
Изгибы и меандры пятен часто отражают направление ветра через поле дрейфовых течений: плавные кривые изгибы указывают на постепенное изменение направления ветра/дрейфовых течений, в то время как резкие изгибы фиксируют резкие изменения (MacDonald, 1998; Espedal, Wahl, 1999).

Общая площадь пятен определяется объемами выбросов из подводного источника, периодичностью разгрузки, а также фракционным составом нефти, выходящей на поверхность, и ГМУ. Линейные размеры нефтепроявлений могут достигать нескольких сотен метров в ширину и нескольких десятков километров в длину (Daneshgar Asl et al., 2017). Разнообразие форм и размеров нефтепроявлений в зависимости от ГМУ (ветра и течений), предшествовавших съемке, показано на рис. 1.

Известным районом распространения ЕН является юго-западная (ЮЗ) часть Каспийского моря, она обладает сложным характером циркуляции, который обусловлен наличием циклонических, антициклонических завихрений, мелко-масштабных вихрей и диполей. Около 90% всех выявленных вихрей в Каспийском море обнаружено благодаря “пленочному механизму”



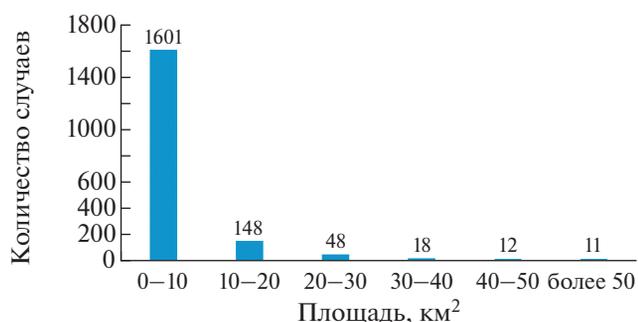
**Рис. 1.** Разнообразие форм нефтепроявлений в Каспийском море и на северо-восточном шельфе о. Сахалин, отображившихся на РЛИ спутников Sentinel-1A/1B.



**Рис. 2.** Пример группировки ЕН в ЮЗ части Каспийского моря и их отображение на оптических изображениях: *а* – контуры обнаруженных нефтепроявлений за 2019 г., интегрированные в ГИС-среде; *б–г* – фрагменты оптических изображений Sentinel-2 от 16.05, 30.07. и 14.08.2019 на район интереса.

(Лебедев и др., 2015). При этом величина и направление поверхностных течений в море могут значительно меняться в зависимости от преобладающего ветра. Например, в ЮЗ Каспии на фоне общего циклонического круговорота, который образуется под действием стока рек (главным образом р. Куры) и ветра, достаточно часто в открытой части моря формируются мелкомасштабные вихри. В работе (Иванов и др., 2007) отмечается, что пятна этой части моря вовлекаются в локальные циклонические круговороты.

Необходимо обратить внимание, что нефтепроявления в ЮЗ части Каспийского моря чаще



**Рис. 3.** Количество случаев регистрации ЕН различной площади по данным спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 в 2019 г. в пределах ЮЗ части Каспийского моря.

принимают серповидную, петлеобразную и спиралевидную формы (рис. 2). Такие конфигурации пятен объясняются дрейфом нефти от места выхода на поверхность под действием фоновых течений с инерционными колебаниями, характерными для Каспийского моря. В основном циклоническая форма спиралей и петель обусловлена наличием изменчивого поля течений в южной части Каспийского моря (Лебедев и др., 2015).

На рис. 2 представлен пример группировки ЕН различной формы в ЮЗ части Каспийского моря, полученный путем визуального дешифрирования РЛИ и оптических снимков Sentinel-1 и Sentinel-2 в период с 1.01 по 31.12.2019 и их последующего ГИС-анализа. Анализ размеров нефтепроявлений в ЮЗ части Каспийского моря показал, что площадь отдельного пятна в основном варьирует в диапазоне от 0.02 до 10 км<sup>2</sup>.

В итоге, признаками значительной энергетической разгрузки подводных источников в данном регионе можно считать площадь образовавшихся пятен более 10 км<sup>2</sup>, а также их форму. Так, в 2019 г. здесь зарегистрировано 237 нефтепроявлений самой разнообразной формы суммарной площадью более 10 км<sup>2</sup> (рис. 3).

**Таблица 1.** Смещение положения пятна нефти (в метрах) на морской поверхности относительно источника на дне в зависимости от постоянной по глубине скорости течения  $V$  (при скорости всплытия пузырьков 20 см/с) (Иванов и др., 2007)

Глубина, м	$V = 10$ см/с	$V = 20$ см/с	$V = 30$ см/с
100	57	100	173
250	142.5	250	432.5
500	285	500	865

#### *Растекание и дрейф на поверхности моря*

Как только нефть из подводных источников попадает на поверхность моря, она начинает подвергаться различным процессам, в частности процессам растекания и дрейфа, смещаясь от точки всплытия. Растекание нефти по поверхности моря происходит вначале под действием сил гравитации, а затем контролируется ее вязкостью и силами поверхностного натяжения (Бескид, Дурягина, 2011; Патин, 2017). Дальнейшая судьба и дрейф нефтяного пятна определяются совместным действием метеорологических и гидрологических факторов. На скорости распространения и последующего фрагментирования пятна влияют поверхностные течения, ветер, волнение моря, турбулентность, приливно-отливные течения — чем интенсивнее совокупность сил, тем быстрее происходят данные процессы (ИТОРФ, 2015). В литературе описан ряд случаев распространения пятен ЕН на несколько километров всего за несколько часов и на несколько десятков километров за несколько дней (Daneshgar Asl et al., 2017).

При известных параметрах скорости и направления ветра и течений, а также времени нахождения пленки на поверхности моря возможно оценить смещение пятна от места всплытия. По оценкам (MacDonald et al., 1993), скорость перемещения нефтяных пятен составляет 60% скорости течения и 2–4% скорости ветра. От места всплытия нефть перемещается по поверхности воды в направлении равнодействующей силы ветра и течения, которая определяется соотношением (Бескид, Дурягина, 2011):

$$U = 0.6U_c + 0.03U_w, \quad (1)$$

где  $U_c$  — скорость течения;  $U_w$  — скорость ветра.

В самом общем случае, среднее время жизни пленок ЕН при благоприятных ГМУ оценивается в 12 ч (Иванов, 2007; Бондур, Кузнецова, 2012). Таким образом, при общих оценках смещение нефтепроявления можно оценить, как произведение найденной скорости дрейфа пятна и среднего времени жизни.

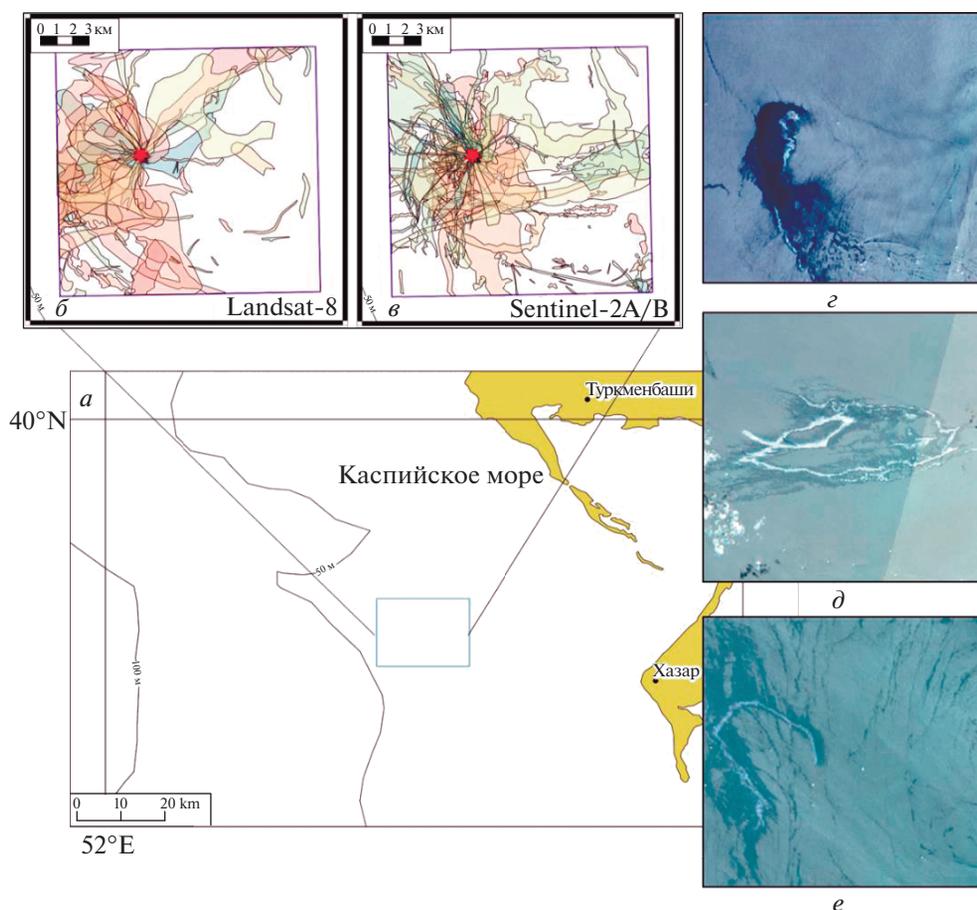
#### *Определение места всплытия*

Определение места (точки) всплытия возможно по набору последовательных разновременных

спутниковых снимков. Нефтепроявления на серии этих РЛИ/снимков создают характерную группировку поверхностных проявлений около точки, координаты которой принимают за точку всплытия. Опыт работы с РЛ-данными показывает, что в целом их точность зависит от географической привязки оригинальных снимков и составляет ~10–20 м. Однако это не равносильно точности привязки пятна-снимка к его подводному источнику, поскольку пятно на поверхности может быть смещено относительно источника на сотни (Иванов и др., 2007), а иногда и тысячи метров (Najoui et al., 2018).

Точность привязки пятна к его подводному источнику зависит от ряда факторов. Во-первых, это факторы среды, и, прежде всего, подповерхностные и поверхностные течения, которые сначала отклоняют восходящую струю пузырьков в оболочке нефти от вертикали, а затем переносят пятно по поверхности моря. Скорость подъема пузырьков газа в оболочке нефти по оценкам составляет 20–25 см/с, причем она уменьшается с увеличением глубины (Иванов и др., 2007; Najoui et al., 2018). Кроме того, в общем восходящем потоке наблюдаются и отдельные капли нефти, скорость всплытия которых несколько меньше. Она зависит от их размера: чем больше капля, тем больше скорость восходящего потока. Время, которое требуется капле нефти, чтобы достичь поверхности, зависит от ее диаметра и глубины моря. Например, для глубин от 1000 до 3000 м среднее время составляет 20 ч, 3 ч и 31 мин для капель нефти диаметром 0.5, 5 и 100 мм соответственно (Najoui et al., 2018). В работе (Иванов и др., 2007) даны оценки смещения нефтепроявления на морской поверхности относительно источника на дне в зависимости от постоянной по глубине скорости течения  $V$  (при скорости всплытия пузырьков 20 см/с) (табл. 1). Из табл. 1 видно, что совокупность снимков точнее отмечает положение источника на дне в мелководных районах моря (глубины 50–250 м), чем в глубоководных.

Рассмотрим результаты анализа в ГИС серии разновременных оптических снимков Sentinel-2A/2B и Landsat-8 акватории Среднего Каспия на рис. 4. В 2019 г. на спутниковых снимках в пределах данного участка наблюдались нефтепроявления, площади которых достигали десятков км<sup>2</sup>, имеющих одно и то же место всплытия



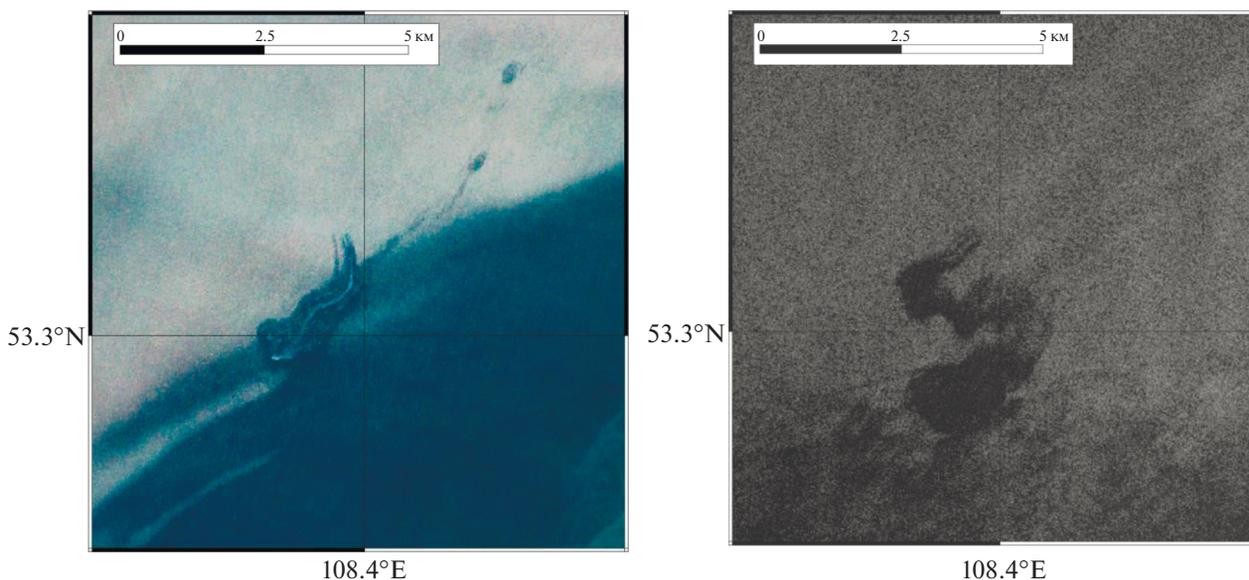
**Рис. 4.** Карты-схемы нефтепроявлений в туркменском секторе Каспийского моря, построенные по данным спутниковых наблюдений, с обозначением точки всплытия: *a* – фрагмент обзорной карты с положением района интереса; *б–в* – контурное отображение нефтепроявлений на снимках спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/2B; *з–е* – примеры отображения нефтепроявления на оптических снимках Sentinel-2A/2B, полученных: 18.05, 12.07 и 21.08.2019 соответственно.

( $52^{\circ}36.2'$  в.д.,  $39^{\circ}32.9'$  с.ш.; глубина  $\sim 50$  м), координаты которого совпали с ранее обнаруженным источником (Crude Accountability, 2013; Митягина, Лаврова, 2020). Если в этой части моря скорости течений у поверхности составляют  $10\text{--}20$  см/с (Лебедев и др., 2015) и они постоянны по глубине, смещение точки всплытия от реального положения подводного источника на дне можно считать минимальным ( $\sim 57$  м) и использовать координаты этого места в качестве координат источника на дне.

Кроме того, хорошо известно, что нефть в море деградирует в результате “выветривания”. По мере удаления пленки нефти от места ее проявления эти эффекты будут приводить к прогрессирующему истончению пленки в результате растекания, пока пятно не перестанет быть различимым. Поэтому пятно, образовавшееся в результате единичного выброса нефти, имеет определенное “время жизни” (MacDonald et al., 1993).

#### *Время жизни на морской поверхности*

Под временем жизни нефтяного пятна на морской поверхности подразумевается промежуток времени между моментом появления нефти и моментом ее исчезновения с поверхности моря в результате взаимодействия с внешней средой. Для продолжительных или продолжающихся выбросов нефти в море всегда наступает момент, когда поступление нефти на поверхность в районе источника уравнивается ее исчезновением за счет испарения, растворения, диспергирования и других процессов выветривания нефти. Указанный баланс между притоком нефти со дна и ее оттоком наступает через разное время в зависимости от интенсивности истечения нефти, ее свойств и ГМУ (Daneshgar Asl et al., 2017). Как уже говорилось, ЕН могут существовать при скоростях ветра не более  $7\text{--}8$  м/с, далее они разрушаются и исчезают с поверхности моря. Daneshgar Asl et al. (2017) отмечают, что при сохранении на-



**Рис. 5.** Нефтепроявление в оз. Байкал, обнаруженное двумя космическими системами: слева – оптический снимок спутника Sentinel-2 от 21.06.2020, 03:55 UTC; справа – радиолокационное изображение Sentinel-1 от 21.06.2020, 22:57 UTC. © ESA.

правления и скорости небольшого преобладающего ветра и течений нефтепроявление может распространиться на десятки км (до 45 км) от места всплытия. При такой длине нефтяного slickа, которую можно измерить на космических снимках, и при средней условной скорости течения 25 см/с, продолжительность жизни ЕН может составлять около 50 ч.

Время жизни нефтяного пятна (и его площадь) значительно влияет на оценки объемов естественного загрязнения (Иванов, 2007; Бондур, Кузнецова, 2012; MacDonald, 1998; MacDonald et al., 2015). Ранее, из общих соображений время жизни пятна ЕН оценивалось в 8–24 ч (Oil in the Sea, 2003; Иванов и др., 2007; MacDonald et al., 2015), что указывало на то, что его активный источник выбрасывает 100 л и более нефти в день. (Здесь заметим, что специальные измерения времени жизни ЕН на поверхности моря неизвестны, различные авторы используют разные методы и оценки для этой задачи).

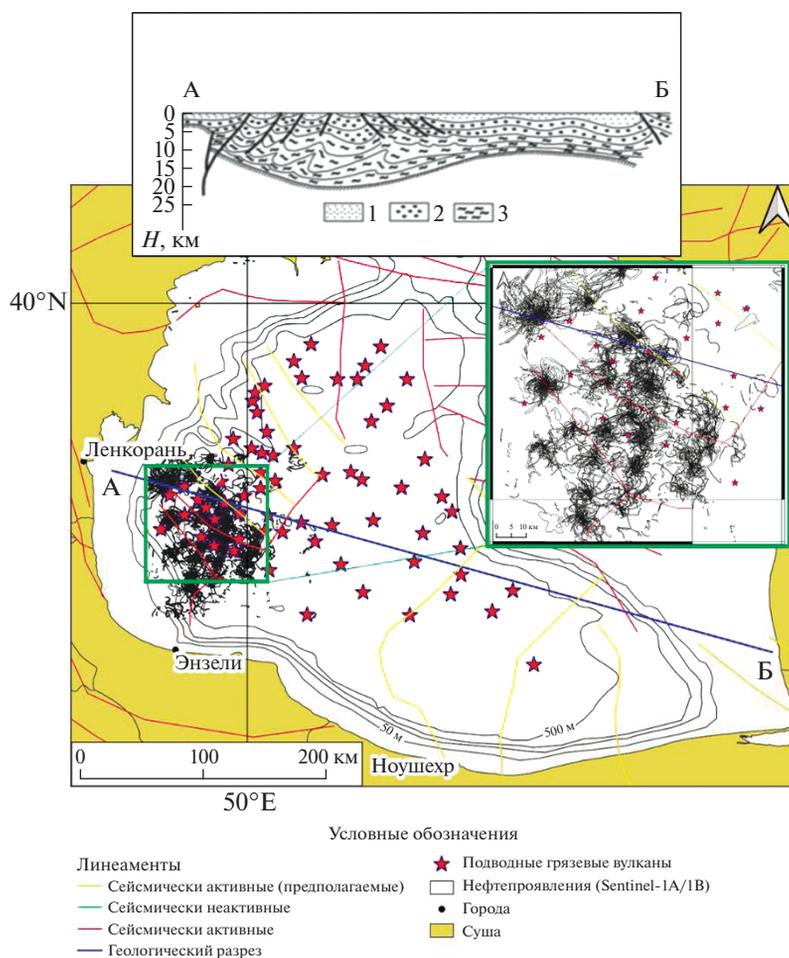
С другой стороны, для оценки времени жизни ЕН можно использовать данные ДЗЗ, полученные квазисинхронно, на которых отобразилось одно и то же нефтепроявление, – это позволяет более реально определить время его жизни. На рис. 5 показан пример такого наблюдения на снимке Sentinel-2 и РЛИ Sentinel-1 на район ЕН близ м. Горевой Утес в оз. Байкал (см. Иванов (2010)). В итоге время жизни данного нефтепроявления можно оценить в 19 ч, причем за это время площадь нефтепроявления увеличилась почти в 3 раза (с 1.9 до 5.6 км<sup>2</sup>).

Дополнительно сообщается, что время жизни коротких slickов составляет около 6 ч, длинных (>10 км) – 12–14 ч (Daneshgar Asl et al., 2017); в некоторых случаях – 6–8 ч (Ivanov et al., 2020; Ivanov, Gerivani, 2020). В итоге в каждом конкретном случае необходимо привлекать квазисинхронные данные ДЗЗ или использовать другую априорную информацию, а умозрительный диапазон сузить до 6–12 ч.

#### *Частота выбросов и периодичность работы подводных источников*

Частота выбросов и периодичность работы подводных источников характеризуется количеством обнаруженных на морской поверхности нефтепроявлений за определенный промежуток времени. Иногда эту информацию можно также извлечь из данных ДЗЗ.

Судя по частоте появления пятен нефти в разные сеансы космической съемки, действие соответствующих подводных источников может быть разнообразным и, скажем, двойным (Иванов и др., 2007). Во-первых, локальная картина повторяющихся пятен нефти может быть сформирована одним источником, действующим периодически. Во-вторых, эта группа пятен может состоять из проявлений разных близкорасположенных источников в виде сопряженных грифонов, салз или других подводных каналов. В этом отношении показательны источники “многократного действия”, например, находящиеся в пределах локальных южно-каспийских структур Ширван-дениз, Инам, Д-35, Курган-дениз, Ирс и Д-7 (рис. 6),



**Рис. 6.** Карта нефтепроявлений, зарегистрированных по данным спутников Sentinel-1A/1B в районе распространения подводных грязевых вулканов и линеаментов Южно-Каспийской впадины. Вверху: геологический разрез чехла Южно-Каспийской впадины в квазиширотном направлении (Холодов, 2012): 1 – верхний плиоцен и антропоген, 2 – нижний и средний плиоцен, 3 – палеоген и миоцен.

нефтепроявления которых обусловлены грязе-вулканической деятельностью.

Процесс одновременного образования совокупности сликов над одним и тем же источником (рис. 1) достаточно интересен и еще малоизучен. Двойные и тройные сигнатуры могут образоваться по двум причинам. С одной стороны, не исключено, что источник, работая периодически, может в течение некоторого промежутка времени выбросить 2–3 порции газа и нефти. В этом случае на поверхности должно образоваться несколько пятен, удаленных друг от друга на некоторые расстояния из-за сноса течением по мере подъема на поверхность и течениями у поверхности. С другой стороны, эти сигнатуры могут быть обусловлены одновременной работой основного источника и двух-трех второстепенных на его периферии. В этом случае также может образоваться несколько пространственно разнесенных пятен. Поэтому обнаружение локальных групп (от 2

до 4) пятен на небольшом участке поверхности моря может означать более или менее постоянную и периодически действующую группу подводных источников. Таким образом, в настоящее время нет однозначного ответа на этот вопрос, однако по мере накопления экспериментальных данных напрашивается вывод о сопряженных источниках на дне моря, которые работают постоянно, периодически или эпизодически.

#### *Толщина пленок*

На поверхности моря пятна ЕН образуют достаточно устойчивый слой тонкой нефтяной пленки (Патин, 2017; MacDonald, 1998). Разница между отражением от тонкого слоя нефти и обычным рассеиванием света морской водой при определенных условиях делает эти пятна весьма заметными для космических аппаратов (MacDonald, 1998).



Рис. 7. Пример цветового кодирования ЕН в Каспийском море на оптическом снимке Sentinel-2 (16.05.2019), классифицированного в соответствии с методом кодирования нефтяных пленок ВАОАС.

Известны различные методы оценки толщины естественных пленок нефти, в пределах которых они существуют на морской поверхности. Здесь отметим минимальную и максимальную границы толщины пленки ЕН, обозначенные в литературе, т.е. 0.04 и 50 мкм (или  $4 \times 10^{-6}$  и  $5 \times 10^{-3}$  мм). Для гашения капиллярных волн и создания видимого эффекта, нефтяные пленки должны иметь микронную толщину (Fingas, 2018; MacDonald et al., 1993, 2015). Наибольшую толщину пленки ЕН имеют вблизи точки всплытия. Под воздействием ветра и течений пленка растекается, ее толщина постепенно уменьшается, и таким образом переносится на некоторое расстояние от места разлива. После достижения критической толщины (порядка 0.1 мкм) целостность нефтяной пленки нарушается, и она начинает разбиваться на отдельные фрагменты.

Толщина пленки может дать представление о составе, интенсивности и объеме подводных выбросов. Для определения толщины нефтяной пленки используют цветовое кодирование (оценка толщины пленки нефти, соотношенная с ее визуальным цветом). Начиная с 1960-х гг., предложен ряд различных методик определения толщины пленок, в настоящее время наиболее актуальная — это методика ВАОАС (Bonn Agreement Oil Appearance Code — ВАОАС (2016)) и руководство ASTM (ASTM, 2017). Цвет нефтяной пленки определяется характером взаимодействия световых волн различной длины с поверхностью воды, покрытой нефтяной пленкой. К факторам, влияющим

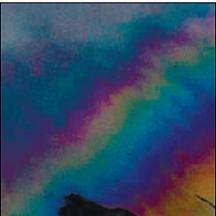
на внешний цветовой вид нефтяной пленки, относят высоту солнца над горизонтом, угол обзора, состояние поверхности моря и тип нефти/нефтепродукта. Наблюдаемый визуально цвет является результатом сочетания этих факторов (Fingas, 2018; ВАОАС, 2016).

Пленки ЕН в большинстве случаев образуются легкими фракциями нефти, реальные цвета которых изменяются от металлически-серого (толщина 5.0–50 мкм) в месте всплытия, радужного (0.3–5.0 мкм) и серебристо-серого (0.04–0.3 мкм) на дальней периферии (Fingas, 2018; ВАОАС, 2016). К настоящему моменту исследователи пришли к выводу о том, что цветовая кодировка достаточно адекватно описывает нефтяные пленки толщиной 1–3 мкм (Fingas, 2018). Значения толщин пленок в зависимости от их цвета представлены в табл. 2.

Согласно табл. 2 наиболее тонкие пленки (0.04–0.3 мкм) при определенном освещении отображаются на морской поверхности в виде серебристо-серых областей. Состав таких пленок представлен самыми легкими фракциями сырой нефти. Они характеризуются испаряемостью в течение нескольких часов и соответственно низкой устойчивостью к факторам внешней среды. Объем нефти в таких пленках оценивают в  $0.04–0.3 \text{ м}^3/\text{км}^2$ .

Пленки толщиной 0.3–5.0 мкм на поверхности моря имеют вид радужных пятен. Их состав представлен легкими фракциями сырой нефти. Они также характеризуются низкой устойчивостью к

**Таблица 2.** Отображение нефтяных пленок различной толщины на оптических снимках и их кодировка согласно ВАОАС (2016)

Код	Фото-пример	Цвет пленки/механизм образования	Состав	Устойчивость к ГМУ/испаряемость	Толщина пленки, мкм	Объем. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>
1		Серебристо-серый (отражение света от пленки и свет, выходящий из верхнего слоя моря)	Легкие фракции сырой нефти, (аналог – бензин)	Низкая устойчивость, испарение в течение несколько часов	0.04–0.3	0.04–0.3
2		Радужный (интерференция света, отраженного от пленки и поверхности воды под пленкой)	Легкие фракции сырой нефти, (аналог – бензин, керосин, газойль)	Низкая устойчивость, испарение до 40% за 24 ч	0.3–5.0	0.3–5
3		Металлический (отражение света главным образом от поверхности пленки)	Легкие и средние фракции сырой нефти, (аналог – дизтопливо)	Средняя устойчивость, испарение легких нефте-продуктов до 10% за 24 ч	5.0–50	5–50

ГМУ, а испаряемость составляет до 40% в течение 24 ч. Объем нефти в радужных пленках может варьировать от 0.3 до 5 м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

Более толстые пленки, которые также могут формировать ЕН, на морской поверхности имеют металлически-серый цвет. “Металлический” – это общий цвет, который определяется эффектом зеркального отражения. Данный цветовой признак существенно зависит от условий освещенности и состояния неба (ИТОРФ, 2015). Состав металлических пленок представлен легкими и средними фракциями сырой нефти. Они характеризуются средней устойчивостью при испаряемости до 10% за 24 ч. Объем нефти в пленках такой толщины может составлять от 5 до 50 м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

Таким образом, оценка толщины пленок необходима для последующего получения информации о подводных выбросах. Для реализации данных целей применяют специальные методики – ВАОАС и ASTM, позволяющие по визуальному цвету нефтяной пленки определить ее толщину.

#### Оценки объемов выбросов

Объемы выбросов, оценку которых можно получить на основе анализа поверхностных проявлений, дает возможность оценить интенсивность работы подводных источников. Оценки объемов

выброшенной нефти напрямую зависят от общей площади пятен и толщины пленки в пятне.

Для определения объемов выброшенной нефти по космическим данным применяется подход, в котором площадь пятен измеряется на снимке, а толщина пленок оценивается из общих физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок с их толщинами (см. выше). Заметим, что разделение пленок по цвету возможно с использованием методов автоматической кластеризации оптических снимков.

На основе измерения площади и оценки толщины по методике ВАОАС (2016) проводится оценка возможного минимального и максимального объема выброса путем умножения площади каждой зоны с учетом покрытия на минимальное или максимальное значение толщины пленки в зависимости от ее цвета:

$$V_{\min} = \sum_1^n (S_n d_{n\min}), \quad (2)$$

$$V_{\max} = \sum_1^n (S_n d_{n\max}), \quad (3)$$

где  $V_{\min}$  – минимальный объем выброса;  $V_{\max}$  – максимальный объем выброса;  $n$  – цветовой код согласно ВАОАС (2016);  $S_n$  – площадь части пленочного образования, соответствующая данному

цветовому коду;  $d_{n \min}$  – нижняя граница диапазона толщины пленки;  $d_{n \max}$  – верхняя граница диапазона толщины пленки.

Наконец, для расчета объемов выбросов в  $\text{м}^3/\text{день}$  целесообразно использовать следующую формулу (Daneshgar Asl et al., 2017; Ivanov, Gerivani, 2020):

$$V_d = Sd \frac{24}{t_r}, \quad (4)$$

где  $V_d$  – объем выброса в день,  $S$  – площадь пятна,  $d$  – толщина пленки,  $t_r$  – время жизни пленки на поверхности моря.

На рис. 7 показан фрагмент снимка Sentinel-2 с нефтепроявлениями, на котором отчетливо видны две точки всплытия, отображающиеся как голубовато-серые пятна (код 3, площадь  $0.95 \text{ км}^2$ ), и шлейф растекающейся нефти радужного и серебристо-серого цвета (коды 1 и 2) суммарной площадью  $19.9 \text{ км}^2$ . Минимальные и максимальные оценки объема, рассчитанные по формулам (2) и (3), составили  $5.5$  и  $54 \text{ м}^3$ ; причем за наиболее реальное значение из общих соображений следует принять  $5.5 \text{ м}^3$  (согласно NOAA (2016) 90% нефти содержится в 10% площади наблюдаемого пятна). Похожий подход использовался в ряде недавних работ, например, в (Sun et al., 2018; Ivanov, Gerivani, 2020).

Заметим, что первоначально для этих целей использовались исключительно данные космической радиолокации – РЛИ, на которых неоднородные по толщине нефтяные пятна отображаются однородным темным тоном (разделение пленочного вещества пятна на фракции при растекании не отображается), в связи с чем оценки, вероятно, получались завышенными (Иванов и др., 2007; Евтушенко, Иванов, 2012).

В итоге определение объемов выбросов подводных источников с использованием данных ДЗЗ сводится к анализу оптических снимков и оценок согласно визуальному цвету и измеренной площади слика. Следует заметить, что эта методика постоянно совершенствуется, в частности, могут быть получены более точные оценки, если учитываются время существования пленок на поверхности моря и динамика их растекания/дрейфа (Daneshgar Asl et al., 2017). Основное ограничение при определении объемов с помощью космических данных заключается в значительных различиях оценок из-за широкого диапазона значений толщины пленки и сложности определения времени жизни пленки. Современные, используемые в расчетах усредненные оценки объемов для тонкой пленки в  $0.1 \text{ мкм}$  и более толстой – в  $1 \text{ мкм}$  дают разницу больше чем в 10 раз.

#### *Связь с эруптивными формами/структурами морского дна*

ЕН образуются на морской поверхности благодаря наличию на морском дне соответствующих геологических структур (эруптивных форм), что сопровождается разгрузкой флюидов в тех или иных геолого-геофизических условиях. Эруптивными формами морского дна принято считать грязевые вулканы, сальзы, грифоны, покмарки и т.п. структуры (Шнюков и др., 1986; Бондур, Кузнецова, 2012).

Единой терминологии для определения морфологических форм, ответственных за нефтепроявления, до сих пор нет. Часто все перечисленные структуры называют общим термином сипы (от англ. *seep* – просачивание) – это различные донные формы или даже небольшие области разгрузки жидких и газообразных УВ на морском дне (Leifer, 2019; Иванов и др., 2020).

Согласно Шнюкову и др. (1986), грязевые вулканы являются основными эруптивными аппаратами грязевого вулканизма, характеризующиеся различной формой с постоянными или эпизодическими во времени извержениями, включающими грязевые массы с газом, водой и нередко со следами нефти, чаще всего располагающиеся группами. Грязевые вулканы включают в себя и более мелкие образования, такие как грязевые сопки или сальзы. К вторичным эруптивным формам относят грифоны, которые образуются на вулканах и сопках. Сальзово-грифонная стадия может рассматриваться как с точки зрения окончания извержения, так и подготовки следующего извержения. Данная стадия характеризуется нарушением монолитности грязевулканических образований, расширением и созданием новых путей (каналов и полостей) разгрузки флюидов (Холодов, 2012).

Рассматривая искусственное грифонообразование, следует помнить, что данное явление часто сопровождает морскую разведку и нефтедобычу. Искусственные грифоны образуются в процессе бурения и эксплуатации скважин, сопровождаясь при этом газо-, нефте- и водовыделениями, которые мигрируют по образовавшимся разломам и трещинам на морское дно. Нередко встречаются случаи утечек нефти из заброшенных скважин или при их реконструкции/дооборудовании (Иванов, Матросова, 2019).

С одной стороны, наличие подобных образований на морском дне может указывать на потенциальные залежи нефти и газа, а также являться поисковым признаком при разведке углеводородных месторождений. Однако, с другой стороны, в настоящее время по данным ДЗЗ установить природу того или иного естественного источника нефти на дне не представляется возможным. Для этого, например, можно использовать другой метод ди-

станционного зондирования, в частности гидролокацию бокового обзора (ГБО) судового базирования, позволяющую получать двумерные картины морского дна.

В связи с ограничением ДЗЗ регистрировать природу естественного источника на дне для установления связи нефтепроявлений, зарегистрированных по космическим изображениям, с эруптивными формами и геологическими структурами привлекают априорные данные об акватории исследования (батиметрия, разломы, наличие известных морфологических форм), которые впоследствии сопоставляют в ГИС среде.

На рис. 6 представлен пример анализа обнаруженных ЕН по данным радиолокационных изображений Sentinel-1A/1B (с 01.01.2019 по 31.12.2019) в ГИС среде, где отображены непосредственно группировки выявленных ЕН, подводные грязевые вулканы, линеаменты разной активности, а также геологический разрез с вертикальным отображением слоев накопления осадков и разломов преимущественно в ЮЗ секторе Каспийского моря. Также на рис. 6 показано пространственное совпадение ЕН с тектоническими разломами и грязевыми вулканами, что подтверждается разломами в пределах геологического разреза (А–Б).

Таким образом, связь нефтепроявлений с эруптивными формами морского дна позволяет привязать ЕН непосредственно к источнику и установить факт его активности. Метод определения связи нефтепроявлений с эруптивными формами морского дна состоит в использовании визуального дешифрирования и ГИС-подхода совместно с геолого-геофизической информацией. Проблемой является частое отсутствие априорных данных об эруптивных формах морского дна и другой подобной информации. Однако совместное использование данных ДЗЗ и ГБО может позволить преодолеть данное ограничение и полностью охарактеризовать подводный источник.

#### *Связь с сейсмичностью, тектоникой и грязевым вулканизмом*

Нефтепроявления в Мировом океане часто возникают в результате совокупного действия сейсмических и тектонических процессов, а также грязевого вулканизма. В работе (Алиев, 2006) утверждается, что мощные землетрясения провоцируют извержения грязевых вулканов, и подчеркивается, что грязевулканическая деятельность может активизироваться как до возникновения землетрясений, так и после. При этом извержения грязевых вулканов также могут быть обусловлены землетрясениями, эпицентры которых находятся на некотором расстоянии. Данное обстоятельство определяет возможность возник-

новения просачиваний нефти не в день землетрясения, а через несколько дней и даже недель. Такой временной диапазон зависит от магнитуды землетрясения, глубины очага и расстояния между эпицентром землетрясения и вулканом. Таким образом, землетрясения могут играть роль “спускового механизма” в грязевулканическом процессе. В свою очередь, причинная связь уверенно устанавливается тогда, когда землетрясения и грязевой вулкан находятся в пределах одной разломной структуры (Алиев, 2006).

В связи с этим нефтепроявления, обнаруженные на снимках из космоса, могут играть роль предвестников землетрясений или быть отражением наблюдавшейся ранее сейсмически-активной обстановки. Данная взаимосвязь устанавливается при совместном использовании данных ДЗЗ и априорной информации о сейсмической и тектонической характеристике региона в ГИС среде.

В качестве примера взаимосвязи зарегистрированных ЕН, сейсмичности, тектоники и грязевого вулканизма с использованием данных ДЗЗ был проведен анализ в ГИС данных о землетрясениях 2019 г., информации о системе разломов и положении грязевых вулканов (рис. 8), а также сведений о зарегистрированных в 2019 г. нефтепроявлениях в ЮЗ части Каспийского моря. Так, в 2019 г. в Каспийском регионе по данным Единой геофизической службы (ЕГС) РАН произошло 54 землетрясения с магнитудой от 3.3 до 5.8 (ЕГС РАН, 2019) и обнаружено 1839 нефтепроявлений на РЛИ/снимках Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B. Отметим, что магнитуда землетрясения (по шкале Рихтера) имеет физический смысл — она связана с его энергией. Чтобы оценить какой силы сотрясения вызывают землетрясения определенной магнитуды в конкретном месте, необходимо знать координаты эпицентра землетрясения, то есть на каком расстоянии от места появления нефтепроявлений оно произошло.

На рис. 9 представлен график соотношения количества ЕН, обнаруженных в спутниковых данных, и магнитуд землетрясений в Южном Каспии и прилегающих к нему районах. На рис. 9 обращает на себя внимание землетрясение, произошедшее 26.04.2019 с магнитудой 4.0 (расстояние от эпицентра землетрясения до района интереса 298 км). В этот день было обнаружено максимальное количество нефтепроявлений — 118. Кроме того, 30.07.2019 и 31.07.2019 на поверхности моря было зарегистрировано 85 и 55 нефтепроявлений соответственно, когда накануне (29.07.2019) произошло землетрясение с магнитудой 3.5 (расстояние от эпицентра землетрясения — 392 км). Однако при минимальной магнитуде 3.3 образовалось одно нефтепроявление, а при максимальной магнитуде 5.8 — два нефтепроявления.

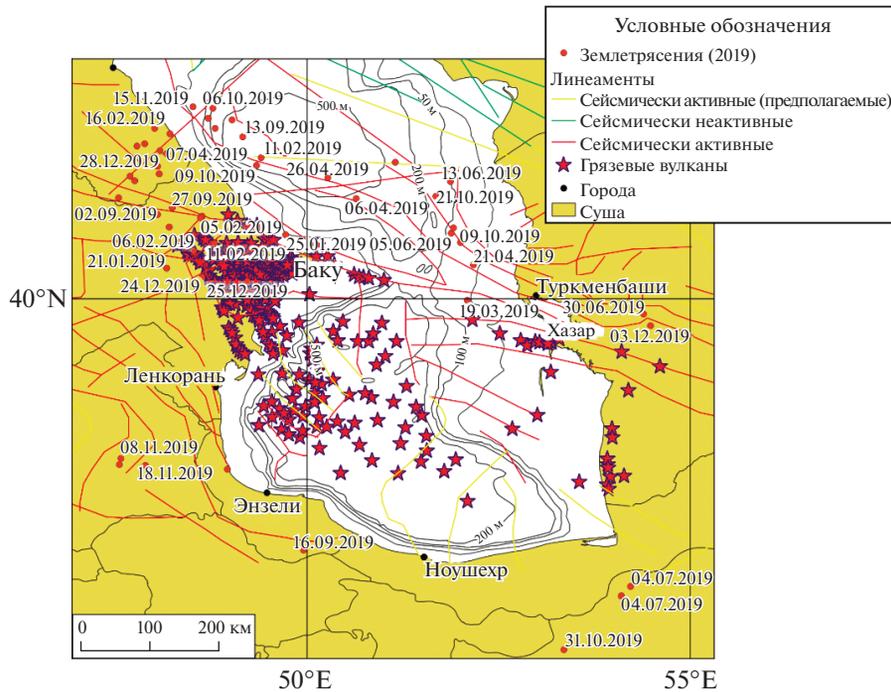


Рис. 8. Карта сейсмичности (точки), тектоники (линии) и грязевого вулканизма (звездочки) Каспийского региона в 2019 г., составленная по данным ЕГС РАН и Алиева (2006).

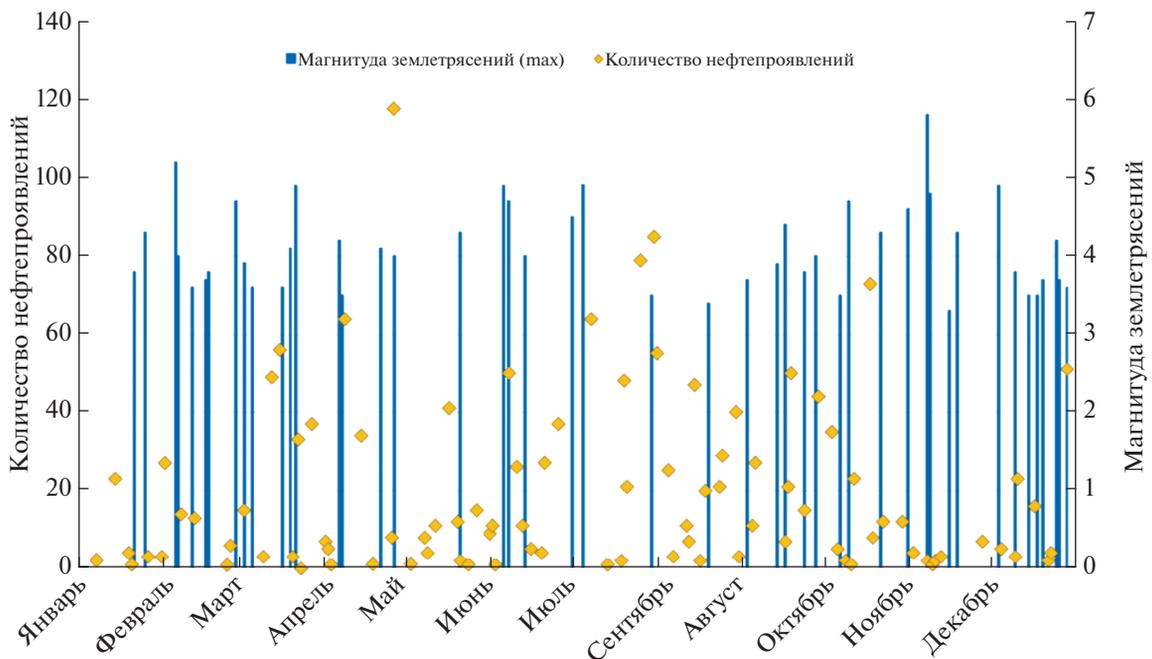


Рис. 9. Количество нефтепроявлений, обнаруженных на космических снимках Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B, и магнитуды землетрясений в Каспийском регионе и прилегающих к нему районах в 2019 г.

В итоге, корреляция обнаруженных ЕН с импульсами сейсмичности оказалась неоднозначной. В связи с чем можно только предполагать об

их взаимосвязи. Выявленная неоднозначность объясняется постоянным сейсмоактивным состоянием Каспийского региона, на фоне которо-

го регулярно активизируются подводные источники и регистрируются нефтепроявления.

#### *Связь с нефтегазоносностью*

Некоторые районы с регулярными нефтепроявлениями расположены в пределах или вблизи известных нефтегазоносных районов (Aminzadeh et al., 2013). Считается даже, что нефтепроявления на суше и море привели к обнаружению месторождений, как это, например, было в Каспийском море (район Баку) и Пенсильвании (США) (Etiop, 2015). Кроме того, известно, что многие ЕН являются результатом разрушения крупных нефтяных резервуаров, в связи с этим просачивания нефти и газа являются одной из предпосылок для добычи нефти в регионе (Бондур 2010, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Link, 1952; Etiop, 2015). Однако в большинстве морских районов, где идет добыча НУ, пятна ЕН на поверхности отсутствуют, а в некоторых районах, наоборот, при наличии ЕН на морской поверхности добыча углеводородов не осуществляется или разведка показала отсутствие крупных залежей (Aminzadeh et al., 2013).

Существуют четыре основных геологических условия, которые должны выполняться, прежде чем бассейн станет коммерческим нефтепромыслом. К ним относятся: (1) достаточная толщина осадочных пород, (2) материнские породы в пределах осадочного комплекса, (3) породы-коллекторы, накапливающие нефть, и (4) ловушки для накопления НУ (Link, 1952).

ЕН доказывают, что в осадочных породах бассейна имеется нефть и ее источник. Согласно (Link, 1952; Etiop, 2015), существуют пять основных типов просачиваний естественных нефтей (рис. 10):

1. выходы нефти из пластов моноклиналиного залегания;
2. выходы нефти, вызванные разрушением и трещиноватостью неглубоко залегающих материнских пород;
3. выходы из крупных скоплений по разломам и трещинам;
4. нефтяные просачивания вдоль стратиграфических несогласий горных пород;
5. выходы нефти, обусловленные интрузивными структурами, такими как грязевые вулканы, магматические интрузии и соляные купола.

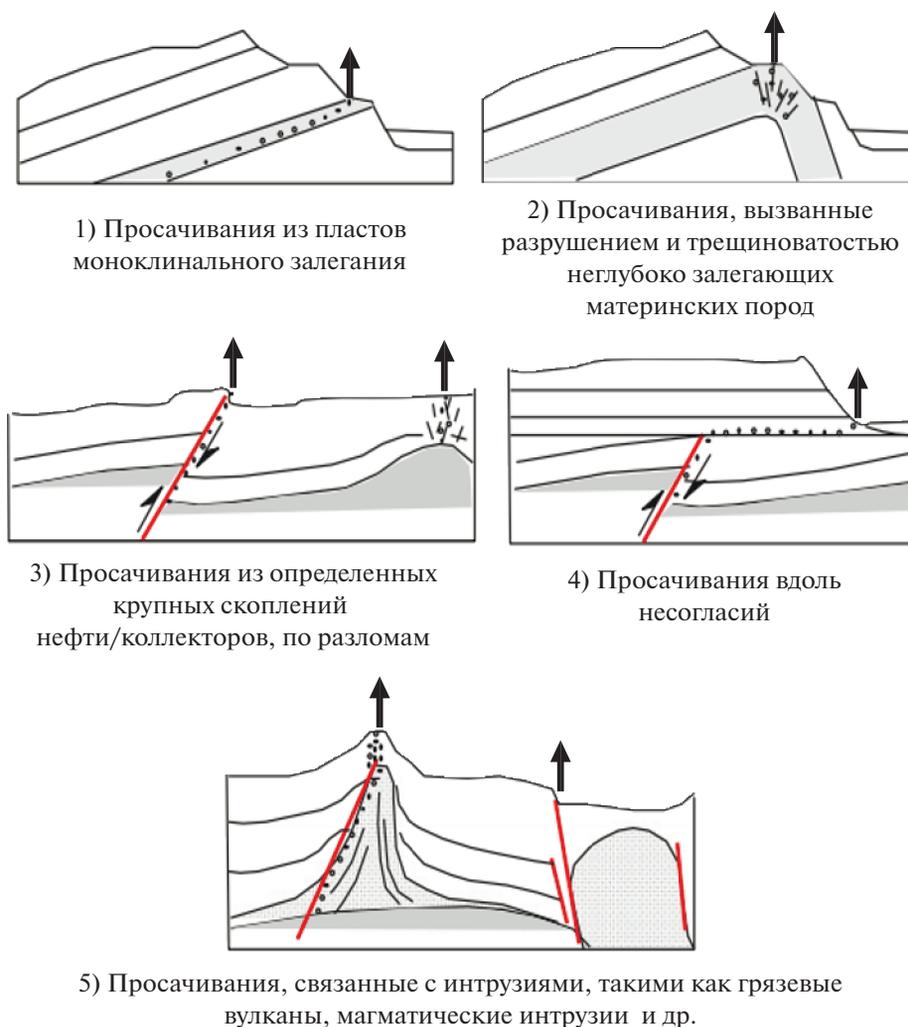
На практике типы 1 и 2 характерны для ЕН и выходов твердофазных НУ (смола, битума, асфальта) с относительно неглубокими (или даже выходящими на поверхность) источниками или резервуарами. Для типов 3, 4 и 5 (причем тип 5 рассматривается как подкатегория типа 3) характерна ведущая роль тектонических разрывов, разломов и трещиноватости и типичны выходы газа (Etiop, 2015).

Высачивания из моноклиналиных пластов возникают там, где нефтеносные пласты выходят на поверхность. Как правило, такие пласты не изобильны, поскольку нефть медленно движется к выходящему на поверхность участку. Такие просачивания обычно небольшие по объему, но постоянные по активности. Нефтяные просачивания, вызванные разрушением и трещиноватостью неглубоко залегающих материнских пород, высвобождаются в небольших количествах, и на поверхность они почти не попадают. Выходы из крупных скоплений нефти часто образуют самые большие зоны просачиваний. Встречаются просачивания, связанные с несогласиями. Нефть и газ мигрируют другими путями (просачивания с I по 3 типы), пока УВ не достигнут несогласий. Далее УВ мигрируют по несогласию по пути наименьшего сопротивления к поверхности. Из-за непрямого пути миграции часто трудно распознать местонахождение источника в недрах, поскольку обнажения часто разветвляются, как ветви на дереве. Аналогичным образом обильные просачивания антиклинального типа сами по себе указывают на то, что значительный резервуар, возможно, был истощен или находится в процессе истощения. В свою очередь просачивания, обусловленные интрузиями, могут быть как связаны, так и не связаны с коллекторами НУ, расположенными ниже (Link, 1952).

Для оценки связи ЕН и скоплений нефти в (Schumacher, 2011) проводился анализ результатов исследования просачиваний из более чем 2700 разведочных скважин, как на суше, так и на море. В результате из скважин, пробуренных на перспективных участках, на которых наблюдались ЕН, 82% были определены как коммерчески перспективные. Когда только 11% скважин, пробуренных на перспективных участках без сопутствующих просачиваний, привели к открытиям месторождений (Etiop, 2015; Kennicutt, 2017; Schumacher, 2011).

Важно понимать, что связь обнаруженных нефтепроявлений с нефтегазоносностью вовсе не однозначна и что все районы с ЕН не должны разбуриваться, но ЕН должны быть учтены при поиске нефтяных месторождений. Так как известно, что, во-первых, большинство продуктивных бассейнов мира привлекли внимание благодаря нефтепроявлениям, а, во-вторых, нефтеистечения не только доказывают наличие нефтеобразующих пластов, но и могут дать дополнительную информацию о коллекторах и их структуре (Link, 1952).

В работе (Иванов и др., 2007) приводится подробное описание локальных структур, располагающихся в пределах Южно-Каспийской впадины. Район осложнен системой разрывных нарушений, диапиризмом и грязевым вулканизмом. По-



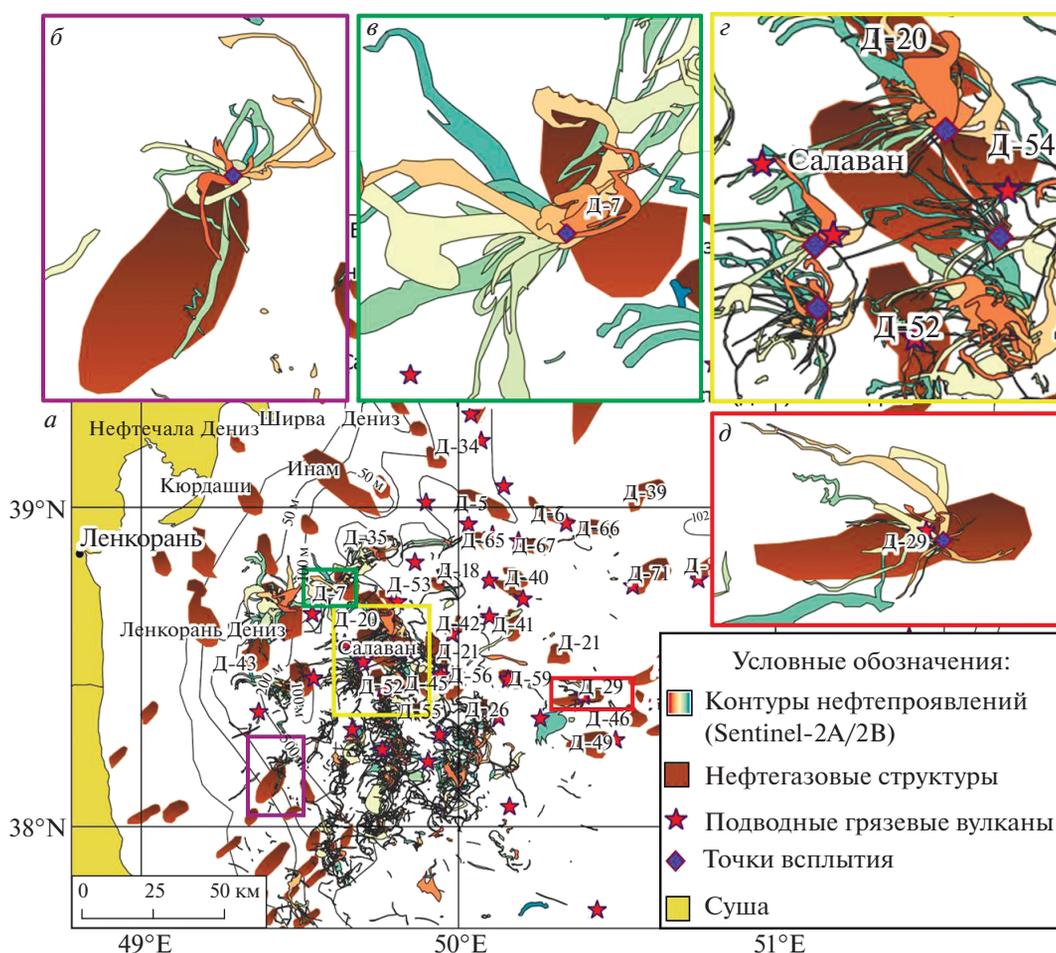
**Рис. 10.** Пять типов углеводородных просачиваний в зависимости от стратиграфических и геоструктурных условий (Етиопе, 2015).

этому здесь действует весь спектр процессов, которые создают условия для выхода флюидов на дно моря. Более детально этот район на предмет нефтегазоносности с привлечением данных ДЗЗ был изучен Ивановым и др. (2015).

В 2019 г. по данным съемки спутников Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B в ЮЗ Каспии было обнаружено 1839 нефтепроявлений (рис. 11). На рисунке синими символами обозначены точки всплытия, а звездочками – подводные грязевые вулканы. Хорошо видно, что большинство ЕН находится в пределах локальных структур, что указывает на их взаимосвязь, а нефтепроявления в пределах нефтегазовых структур однозначно могут указывать на нефтегазоносность района. Более того, некоторые нефтепроявления появляются регулярно, они обширны и находятся в пределах структур D-54, D-7 и D-29, вблизи структур Savalan и D-52 и известных грязевых вулканов, что дает основания отнести их к 3 и 5 типам (рис. 10),

характеризующихся выходами из скоплений нефти и выходами, связанными с интрузиями. Помимо этого, нефтепроявления наблюдались в пределах нефтегазоносной структуры в иранской части моря (Ivanov et al., 2020).

Таким образом, связь нефтепроявлений с нефтегазоносностью является недостаточно ясной. Классификация выходов нефти дает представление об их взаимосвязи, в частности, ЕН, связанные с крупными месторождениями, характеризуются высокой частотой, большими объемами и приуроченностью к нефтегазовым залежам. В свою очередь похожими характеристиками обладают ЕН, обусловленные интрузиями (часто не связанными с коллекторами НУ в недрах). Поэтому космическая информация должна безусловно учитываться при поиске перспективных залежей УВ, но она не является основополагающей.



**Рис. 11.** Распространение ЕН в пределах локальных нефтегазовых структур и грязевых вулканов в ЮЗ части Каспийского моря. На фрагментах: *а* – общая карта с наложенными нефтегазовыми структурами, грязевыми вулканами, контурами обнаруженных нефтепроявлений и выделенными областями наибольшего совпадения; *б–д* – увеличенные фрагменты областей с выделенной точкой всплывтия в пределах нефтегазовых структур и вблизи грязевых вулканов. Рисунок составлен по данным космических снимков Sentinel-2A/2B, геологической информации о положении нефтегазовых структур (Иванов и др., 2007) и грязевых вулканов (Алиев, 2006).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, основными значимыми параметрами ЕН, которые можно извлечь из данных ДЗЗ, предлагается считать следующие: форма и размеры, специфика растекания и дрейфа на морской поверхности, частота выбросов и периодичность появления, толщина пленок, объем выбросов, приуроченность к эруптивным формам морского дна, возможная связь с сейсмичностью, тектоникой, грязевым вулканизмом, а также с нефтегазоносностью.

В настоящее время анализ оптических и радиолокационных изображений позволяет определить большинство характеристик ЕН и его подводного источника на дне, состав, интенсивность и объемы выбросов, а также оценить перспективность нефтегазоносности региона.

Местоположение источника на дне с точностью 20–100 м (что определяется как точностью географической привязки снимков, так и точностью определения места всплывтия) может быть установлено путем анализа в ГИС пространственно-временной группировки пятен-сликов, обнаруженных на последовательных РЛИ, полученных в течение нескольких месяцев. Наличие повторяющихся друг друга сигнатур на поверхности моря говорит о наличии главного и второстепенных источников на дне (например, грязевого вулкана, осложненного грифонами и сольсами).

Об интенсивности и объемах выбросов может сообщать набор следующих значимых параметров ЕН: форма, размер и время жизни пятен. Форма и размер пятен, измеренные на оптических снимках и РЛИ, могут говорить об интенсивности разгрузки подводного источника и преобладающих гидрометеорологических условиях. Время жизни

ЕН является значимым параметром при получении точных оценок объемов истечений. По оценкам разных авторов считается, что время жизни составляет от 6 до 24 ч. Толщина пленки в ЕН позволяет оценить состав, постоянство и объем нефтевыбросов. Пленки ЕН в большинстве случаев образованы легкими фракциями нефти, толщина которых варьирует в диапазоне от 5 мкм (места всплывий) до 0.04 мкм (на дальней периферии). Оценки объемов выбросов нефти в высокой степени зависят от знания времени жизни пятна на поверхности моря и знания толщины пленки в пятне, в то время как площадь пятна может быть измерена на космических снимках достаточно точно.

Связь с сейсмичностью неоднозначна (хотя ранее утверждалось противоположное), что было показано для 2019 г. В связи с тем, что возникновение ЕН может происходить до землетрясения, во время землетрясения, а также через несколько дней и даже недель после него, нефтепроявления не могут рассматриваться в качестве индикаторов сейсмоактивности региона, а также в качестве предвестников землетрясения.

Для оценки перспективности морского региона на нефть и газ с помощью данных ДЗЗ необходимо проводить анализ всех обнаруженных ЕН в ГИС совместно с априорной геолого-геофизической информацией. Согласно приведенной в настоящем обзоре классификации просачиваний, ЕН, связанные с крупными залежами НУ, характеризуются высокой частотой, большими объемами и приуроченностью к нефтегазовым структурам. В свою очередь, похожими характеристиками обладают просачивания интрузионного типа, которые могут быть и не связаны с коллекторами УВ в недрах морского дна. Тем не менее, космическая информация должна учитываться при поиске перспективных залежей углеводородов, но она не должна являться основной и самодостаточной.

Из ограничений методов ДЗЗ отметим следующее: 1) толщина пленки, как ключевой параметр в расчетах, до сих пор со спутников не измеряется, в связи с этим для расчетов используется широкий диапазон оценок, например, от 0.1 до 1 мкм; 2) время жизни пленки каждый раз определить сложно, однако не невозможно; 3) в связи с этим общие оценки объемов поступающей нефти для той или иной акватории существенно различаются. Кроме того, частым ограничением применения данных ДЗЗ при исследовании ЕН и их источников является недоступность или отсутствие необходимых априорных данных.

В настоящее время широко распространенным инструментом, позволяющим картографировать морское дно в 2D, становится подспутниковая акустическая гидролокация с помощью ГБО. Та-

кие совместные исследования с использованием данных ДЗЗ и ГБО позволят полностью охарактеризовать тот или иной подводный источник НУ в Мировом океане.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация и обобщение результатов исследований естественных нефтепроявлений и их взаимосвязи с подводными источниками нефти крайне важны в свете современных научных тенденций. В обзоре обобщены результаты исследований естественных нефтепроявлений в море, рассмотрены их типичные характеристики, которые могут быть получены путем обработки и анализа данных космической радиолокационной и оптической съемки, а также современные способы их определения. На конкретных примерах для Каспийского моря продемонстрирована необходимость комплексного анализа данных дистанционного зондирования и различной априорной информации для восстановления значимых параметров естественных нефтепроявлений и их подводных источников. Показано, что сосредоточенность пятен-сликов в том или ином месте, выявленная по временному ряду данных спутникового мониторинга в течение некоторого периода времени (от месяца до полугода), однозначно указывает на наличие подводного источника на дне.

Поиск, обнаружение и исследование естественных нефтепроявлений необходимы по ряду причин, в частности, эта информация крайне важна в задачах исследования нефтегазоносности, безопасности морской нефте- и газодобычи и даже в задачах изучения климата. Помимо того, что нефтепроявления способствуют индикации залежей углеводородов, они являются еще источниками естественного загрязнения, которое необходимо учитывать в общих и частных оценках антропогенного загрязнения морей. Показано, что исследования естественных нефтепроявлений с помощью данных дистанционного зондирования при правильной постановке задачи, использовании их характеристик, а также при интеграции с геолого-геофизическими данными позволяют получать дополнительную информацию о возможной нефтегазоносности той или иной акватории, перспективах и рисках морских нефтеразработок, включая ее экологическое состояние. Рассмотренные в работе методы и подходы позволили обнаружить, изучить и верифицировать естественные нефтепроявления в ряде мест Баренцева, Азовского, Черного, Каспийского и Охотского морей, а также в оз. Байкал.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 0128-2021-0001, FNEE-2021-0002 и Соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алиев Ад.А.* Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир. 2012. 558 с.
- Бескид П.П., Дурягина Е.Г.* Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 1 (63). С. 71–75.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. М.: Научный мир, 2012. С. 15–37.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
- Бондур В.Г., Замшин В.В.* Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. С. 255–271.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43. <https://doi.org/10.7868/S020596141504003X>
- Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., и др.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Исследование естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности по космическим изображениям // Актуальные проблемы нефти и газа. 2012. № 2(6). С. 1–10.
- Гаврилов В.П.* Космический мониторинг современных процессов образования углеводородов / “Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса”. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир. 2012. С. 38–49.
- Гасанов А.Г., Керамова Р.А., Агапов Н.И.* Связь сейсмичности, грязевого вулканизма, появления геохимических аномалий в подземных водах Каспийского региона // Отечественная геология. 2005. № 1. 69–72.
- Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю.* Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 24–30.
- ЕГС РАН. Информация о землетрясениях 2019 (<http://www.gsras.ru/new/ssd.htm>).
- Затягалова В.В.* О некоторых особенностях естественных выходов углеводородов в восточной части Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 194–201.
- Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю.* Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса, 2010. № 2. С. 75–87.
- Иванов А.Ю.* Естественные нефтепроявления в Каспийском и Баренцевом морях: обнаружение и анализ по данным дистанционного зондирования // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 52–64. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(5\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4)
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягалова В.В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Терлеева Н.В.* Сравнительный анализ распределения естественных нефтепроявлений в юго-западной части Каспийского моря по данным космической радиолокации с оценкой нефтегазоносности недр // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 47–61.
- Иванов А.Ю., Затягалова В.В.* Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
- Иванов А.Ю., Матросова Е.Р.* Техногенная грифонная активность в северо-западной части Черного моря по данным съемок из космоса // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 57–63.
- Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю. и др.* Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в

- морях России по данным космической радиолокационной съемки // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62.  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
- Клименко С.К., Иванов А.Ю., Терлеева Н.В.* Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // Исслед. Земли из космоса. 2022 (в печати).
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- Лебедев С.А., Костяной А.Г., Гинзбург А.И.* Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования / Материалы III Межд. научно-практической конференции “Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий”. Майкоп, 2015. С. 146–179.
- Лимонов А.Ф.* Грязевые вулканы // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 63–69.
- Митягина М.И.* Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Черного моря по данным многолетних спутниковых наблюдений // Вестник ТГУ. Сер. геогр. и геоэкол. 2018. № 3. С. 125–136.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Выход естественных углеводородов со дна Каспийского моря в районе туркменского шельфа, выявленный по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 292–298.
- Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН: Вып. 209. М.: Гидрометеиздат, 2005. С. 248–271.
- Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. Т. 1. Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. 326 с.
- Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е., Чудакова М.А.* Мониторинг естественных нефтепроявлений вдоль северо-восточного побережья острова Сахалин на основе радиолокационных и оптических данных ДЗЗ // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. № 2. С. 63–69.  
[https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2\(293\)-63-69](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2(293)-63-69)
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 7–16.
- Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: распространение и генезис // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.
- Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др.* Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Атлас. Киев. Наукова Думка, 1986, 152 с.
- Шнюков Е.Ф., Алиев Ад.А., Рахманов Р.Р.* Грязевой вулканизм Средиземного, Черного и Каспийского морей: Специфика развития и проявления // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2017. № 2. С. 5–25.
- Aminzadeh F., Berge T.B., Connolly D.L.* Hydrocarbon seepage: From source to surface. Society of Exploration Geophysicists and AAPG, 2013. 253 p.  
<https://doi.org/10.1190/1.9781560803119>
- ASTM (American Society for Testing and Materials International). Guide for visually estimating oil spill thickness on water, 2017.
- BAOAC (Bonn Agreement Aerial Operations Handbook). The Netherlands: Bonn Agreement, 2016. 123 p.
- Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water – Evaluation and Management, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of formation of remote sensing and sea truth databases for the monitoring of anthropogenic impact on ecosystems of coastal water areas // Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive ground-space monitoring of anthropogenic impact on Russian Black Sea coastal water area, Eds K.V. Anisimov et al., Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”, 2018. P. 625–637.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
- Crude Accountability, 2013 (<https://crudeaccountability.org/wp-content/uploads/2013/05/20130506-HiddenIn-PlainSight.pdf>).
- Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., MacDonald I.R.* Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps // Remote Sens. Environ. 2017. V. 189. P. 96–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.003>
- Espedal H.A., Wahl T.* Satellite SAR oil spill detection using wind history information // Int. J. Remote Sens. 1999. V. 20. P. 49–65.  
<https://doi.org/10.1080/014311699213596>
- Etiop G.* Seepage in Field Geology and Petroleum Exploration. Natural Gas Seepage. Cham: Springer International Publishing, 2015.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0_5)
- Fingas M.* The challenges of remotely measuring oil slick thickness // Remote Sens. 2018. V. 10. № 2. P. 319.  
<https://doi.org/10.3390/rs10020319>
- Geersen J., Scholz F., Linke P. et al.* Fault zone controlled seafloor methane seepage in the rupture area of the 2010 Maule Earthquake, Central Chile // Geochem. Geophys. Geosyst. 2016. V. 17. P. 4802–4813.  
<https://doi.org/10.1002/2016GC006498>
- ГОПФ, 2015. Воздушное наблюдение морских разливов нефти.  
[https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation\\_ru.pdf](https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation_ru.pdf)
- Ivanov A. Yu., Gerivani H.* Oil leaking and seeping site in the Persian Gulf detected and studied by satellite observations // Mar. Georesour. Geotec. 2020.  
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1853286>

- Ivanov A. Yu., Gerivani H., Evtushenko N.V.* Characterization of natural hydrocarbon seepage in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020. V. 38. № 5. P. 527–538. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1600175>
- Ivanov A. Yu., Morović M.* Oil seeps detection and mapping by SAR imagery in the Adriatic Sea // *Acta Adriatica.* 2020. V. 61(1). P. 13–26. <https://doi.org/10.32582/aa.61.1.1>
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology.* 2004. P. 53–58.
- Kennicutt M.C.* Oil and gas seeps in the Gulf of Mexico // *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: before the Deepwater Horizon oil spill: V. 1.* Ed. C.H. Ward. Springer, New York, 2017. P. 275–358. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_5)
- Klemas V.* Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // *J. Coastal Res.* 2010. V. 26. N 5. P. 789–797. <https://doi.org/10.2112/10A-00012>
- Kvenvolden K.A., Cooper C.K.* Natural seepage of crude oil into the marine environment // *Geo-Mar. Lett.* 2003. 23(3–4). P. 140–146. <https://doi.org/10.1007/s00367-003-0135-0>
- Leifer I.A.* Synthesis review of emissions and fates for the Coal Oil Point marine hydrocarbon seep field and California marine seepage // *Geofluids.* 2019. V. 2019. ID 4724587. 48 p. <https://doi.org/10.1155/2019/4724587>
- Link W.K.* Significance of oil and gas seeps in world oil exploration // *AAPG Bull.* 1952. V. 36. № 8. P. 1505–1540.
- Liungman O., Mattson J.* Scientific documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2011 (<https://stw-helcom.smlhi.se/>).
- Macdonald I., Guinasso N., Ackleson S. et al.* Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. C9. P. 16351–16364. <https://doi.org/10.1029/93JC01289>
- MacDonald I.* Natural oil spills // *Sci. Am.* 1998. V. 279. P. 56–61. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1198-56>
- MacDonald I., Garcia-Pineda O., Beet A. et al.* Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 12. № 120. P. 8364–8380. <https://doi.org/10.1002/2015JC011062>
- Najoui Z., Riazanoff S., Deffontaines B., Xavier J-P.* Estimated location of the seafloor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico // *Mar. Pet. Geol.* 2018. V. 91. P. 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>
- NOAA, 2016. Open water oil identification job aid for aerial observation with standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes. Office of Response and Restoration, Ver. 3. ([https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA\\_2016.pdf](https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA_2016.pdf)).
- Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. The National Academies Press, Washington, 2003.
- Schumacher D.* Pre-drill prediction of hydrocarbon charge: microseepage-based prediction of charge and post-survey drilling results / AAPG International Conference and Exhibition, Oct. 23–26, 2011, Milan, Italy ([https://www.search-anddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx\\_schumacher.pdf.htm](https://www.search-anddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx_schumacher.pdf.htm)).
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science.* 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Sun S., Hu C., Garcia-Pineda O. et al.* Remote sensing assessment of oil spills near a damaged platform in the Gulf of Mexico // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. V. 136. P. 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.004>
- Vasilev A., Tsekov M., Petsinski P. et al.* New possible earthquake precursor and initial area for satellite monitoring // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 8. ID 586283. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.586283>

## Determination of Characteristics of Natural Oil Seeps and Their Underwater Sources from Remote Sensing Data

E. R. Matrosova<sup>1</sup>, V. N. Khodaeva<sup>1</sup>, and A. Yu. Ivanov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The basic characteristics of natural oil seeps and possibilities of their determination according to space radar and optical imagery are considered and systematized. It is shown that the analysis of successive optical and radar surveys makes it possible to determine the characteristics of natural oil seeps discussed in the work, by which it becomes possible to assess the location of their underwater sources, intensity and volume of emissions, geophysical state and prospects of oil and gas content in the region. The possibilities, limitations, and prospects of application of remote sensing data in these tasks are discussed. The review character of the work made it possible to take into account modern methods and results of the recent studies of natural oil seeps using remote sensing data.

*Keywords:* natural oil seeps, sea surface, remote sensing, SAR images, optical images, oil and gas content

## REFERENCES

- Aliiev A.A.* Gryazevoi vulkanizm Yujno\_Kaspiiskogo neftegazonosnogo basseina [Mud volcanism of the South Caspian oil and gas bearing basin] // *Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2006. № 3. P. 35–51 (In Russian).
- Aerospace Monitoring of Objects of Oil and Gas Facilities. Ed. V. G. Bondur, Moscow: Scientific World. 2012. 558 P. (In Russian)
- Beskid P.P., Duryagina E.G.* Harakteristika processov transformacii nefi v morskoi srede i ih vliyaniye na operacii po likvidacii avariinnykh razlivov nefi [The characteristic of processes of transformation of oil in the sea environment and their influence on operations on liquidation of emergency spills] // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2011. № 1(63). P. 71–75. (In Russian)
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. (In Russian)  
<https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
- Bondur V.G.* Aerokosmicheskii monitoring neftegazonosnykh territorii i obektov neftegazovogo kompleksa. Real'nosti i perspektivy [Aerospace monitoring of oil and gas-bearing areas and objects of the oil and gas complex. Realities and perspectives] / "Aerospace monitoring of oil-and-gas facilities" ed. V.G. Bondura. Moscow: Scientific World. 2012. P. 15–37. (In Russian)
- Bondur V.G., Vorobjev V.E., Grebenjuk Y.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Study of fields of currents and pollution of the coastal waters on the Gelendzhik Shelf of the Black Sea with space data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. (In Russian).  
<https://doi.org/10.1134/S000143381309003X>
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* Variability of internal tides in the coastal water area of Oahu Island (Hawaii) // *Oceanology*. 2008. V. 48. № 5. P. 611–621. (In Russian)  
<https://doi.org/10.1134/S0001437008050019>
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 5. P. 598–607. (In Russian)  
<https://doi.org/10.1134/S0001433809050077>
- Bondur V.G., Kuznetsova T.V.* Detecting Gas Seeps in Arctic Water Areas Using Remote Sensing Data. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. № 9. P. 1060–1072. (In Russian)  
<https://doi.org/10.1134/S0001433815090066>
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Kosmicheskii radiolokatsionnyy monitoring morskikh akvatoriy v rayonakh dobychi i transportirovki uglevodorodov [Space radar monitoring of offshore regions in the areas of hydrocarbon production and transportation] / "Aerospace monitoring of oil-and-gas facilities" ed. V.G. Bondura. Moscow: Scientific World. 2012. P. 255–271. (In Russian)
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Vydelenie melkomasshtabnykh neodnorodnostey opticheskikh kharakteristik verkhnego sloya okeana po mnogoazonalnym sputnikovym izobrazheniyam vysokogo razresheniya. Chast 1. Effekty sbrosa drenazhnykh kanalov v pribrezhnyye akvatorii (Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61. (In Russian)
- Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V. et al.* Studies of hydrophysical processes during monitoring of the anthropogenic impact on coastal basins using the example of Mamala Bay of Oahu Island in Hawaii // *Oceanology*. 2007. V. 47. № 6. P. 769–787. (In Russian)  
<https://doi.org/10.1134/S0001437007060033>
- Bondur V.G., Kuznetsova T.V.* Issledovanie estestvennykh nefte- i gazoprovyavlenii na vodnoi poverhnosti po kosmicheskim izobrazheniyam [Investigation of natural oil and gas occurrences on the water surface by space images] // *Actual problems of oil and gas*. 2012. № 2(6). P. 1–10. (In Russian)
- Gavrilov V.P.* Kosmicheskii monitoring sovremennykh processov obrazovaniya uglevodorodov [Space monitoring of modern hydrocarbon formation processes] / *Aerospace Monitoring of Oil-and-Gas Facilities*. Ed. V.G. Bondur. Moscow: Scientific World. 2012. P. 38–49. (In Russian)
- Gasarov A.G., Keramova R.A., Agapov N.I.* Svyaz seismichnosti, gryazevogo vulkanizma, poyavleniya geokhimicheskikh anomalii v podzemnykh vodakh Kaspiiskogo regiona [Relationship seismicity, mud volcanism, the appearance of geochemical anomalies in the groundwater of the Caspian region] // *Otechestvennaya geologiya*. 2005. № 1. P. 69–72. (In Russian)
- Evtushenko N.V., Ivanov A.Yu.* Nefteproyavleniya v yugo-vostochnoi chasti Chernogo morya po dannim kosmicheskoi radiolokacii [Oil seeps in the Southeastern Black Sea studied from space using SAR images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2012. № 3. P. 24–30. (In Russian)
- EGS RAS. Earthquake information 2019 (<http://www.gsr.ru/new/ssd.htm>).
- Zatyagalova V.V.* O nekotorykh osobennostyakh yestestvennykh vykhodov uglevodoroda v vostochnoy chasti Azovo-Chernomorskogo basseina [On some specifics natural hydrocarbon seeps in the eastern part of the Azov and Black Sea basins] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9. № 4. P. 194–201. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Sliki i plenochnie obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh [Slicks and film formations in space radar images] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 3. P. 73–96. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Nefteproyavleniya na poverhnosti ozera Baikal [Oil occurrences on the surface of Lake Baikal] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2010. № 2. P. 75–87. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Remote sensing detection and analysis of oil seeps in the Caspian Sea and the Barents Sea // *J. Oceanological Research*. 2019. V. 47. P. 52–64. (In Russian)  
[https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(5\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4)
- Ivanov A.Yu., Golubov B.N., Zatyagalova V.V.* O neftegazonosnosti i razgruzke podzemnykh flyuidov v yujnoi chasti Kaspiiskogo morya po dannim kosmicheskoi radiolokacii [On oil-gas-bearing and unloading of underground fluids in the southern part of the Caspian Sea using synthetic aperture radar images] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 2. P. 62–81. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Golubov B.N., Terleeva N.V.* Sravnitel'nyy analiz raspredeleniya yestestvennykh nefteproyavleniy v yugo-zapadnoy chasti Kaspiyskogo morya po dannym kosmi-

- cheskoy radiolokatsii s otsenkoy neftegazonosnosti neдр [Comparative analysis of oil seep slick distribution in the Southern Caspian Sea with estimation of oil and gas bearing using satellite SAR images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 6. P. 47–61. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Zatyagalova V.V.* Kartografirovaniye plenochnykh zagryazneniy morya s ispol'zovaniyem kosmicheskoy radiolokatsii i geograficheskikh informatsionnykh sistem [Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 6. P. 46–63. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Matrosova E.R.* Tekhnogennaya grifonnaya aktivnost' v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya po dannym s'yemok iz kosmosa [Technogenically provoked seepage activity in the Northwestern Black Sea according to data from space] // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. V. 23. № 8. P. 57–63 (In Russian).
- Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu. et al.* Search and Detection of Natural Oil Seeps in the Russian Seas Using Spaceborne SAR Imagery // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 5. P. 43–62. (In Russian)  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
- Klimenko S.K., Ivanov A.Yu., Terleeva N.V.* Film pollution of Kerch Strait according to the five-year radar monitoring: current state and main sources // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2022. (In Russian) (in print).
- Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A. et al.* Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas, Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (In Russian)
- Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I.* Dynamics of the Caspian Sea based on instrumental measurements, modeling results and remote sensing data // *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies”*. Maykop, 2015. P. 146–179. (In Russian)
- Limonov A.F.* Gryazevie vulkani [Mud volcanoes] // *Sorosovskii obrazovatel'nyi jurnal*. 2004. V. 8. № 1. P. 63–69. (In Russian)
- Mityagina M.I.* Rasprostraneniye plenok estestvennykh nefteproyavlenii na morskoi poverhnosti yugo-vostochnoi chasti Chernogo morya po dannim mnogoletnih sputnikov-ih nablyudeniim [Distribution of films of natural oil occurrences on the sea surface of the south-eastern part of the Black Sea according to long-term satellite observations] // *Vestnik TGU. Ser. geogr. i geokol.* 2018. № 3. P. 125–136. (In Russian)
- Mityagina M.I., Lavrova O.Yu.* A point of petroleum hydrocarbons emission from the seabed in the Turkmenian shelf area of the Caspian Sea discovered via satellite data // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 2. P. 292–298. (In Russian)
- Ovsienko S.N., Zatsapa S.N., Ivchenko A.A.* Modelirovaniye razlivov nefi i ozenka riska vozdeistviya na okrujayuschuyu sredu [Modeling oil spills and risk assessment of environmental impact] // *Trudi GOIN*. V. 209. Moscow: Gidrometeoizdat. 2005. P. 248–271. (In Russian)
- Patin S.A.* Oil and continental shelf ecology: in two volumes. 2nd edition revised and extended. V. 1: offshore oil and gas industry: present situation, prospects, factors of impact. Moscow: VNIRO, 2017. 326 p. (In Russian)
- Sizov O.S., Lobzhanidze N.E., Chudakova M.A.* Monitoring of natural fluid slicks along the north-eastern coast of Sakhalin island based on radar and optical data of earth remote sensing // *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*. 2020. № 2. P. 63–69. (In Russian)  
[https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2\(293\)-63-69](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2(293)-63-69)
- Stanovoy V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A.* Sistema modelirovaniya razlivov nefi v ledovitykh moryakh [Oil modeling system for ice-infested seas] // *Problemi Arktiki i Antarktiki*. 2007. V. 77. P. 7–16. (In Russian)
- Kholodov V.N.* Gryazevie vulkani rasprostraneniye i genesis [Mud volcanoes: distribution and genesis] // *Geologiya i poleznie iskopaemiy Mirovogo okeana*. 2012. № 4. P. 5–27. (In Russian)
- Shnyukov E.F., Sobolevsky Yu.V., Gnatenko G.I. et al.* Gryazevie vulkani Kerchensko-Tamanskoi oblasti. Atlas. [Mud volcanoes of the Kerch-Taman region. Atlas.] // *Kiev. Naukova Dumka*, 1986. 152 p. (In Russian)
- Shnyukov E.F., Aliev A.A., Rakhmanov R.R.* Gryazevoi vulkanizm Sredizemnogo, Chernogo i Kaspiiskogo morei. Specifika razvitiya i proyavleniya [Mud volcanism of Mediterranean, Black and Caspian seas: specificity of development and manifestations] // *Geologiya i poleznie iskopaemiy Mirovogo okeana*. 2017. № 2. P. 5–25. (In Russian)
- Aminzadeh F., Berge T.B., Connolly D.L.* Hydrocarbon seepage: From source to surface. Society of Exploration Geophysicists and AAPG, 2013. 253 p.  
<https://doi.org/10.1190/1.9781560803119>
- ASTM (American Society for Testing and Materials International). Guide for visually estimating oil spill thickness on water, 2017.
- BAOAC (Bonn Agreement Aerial Operations Handbook). The Netherlands: Bonn Agreement, 2016. 123 p.
- Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management*. InTech, Croatia. 2011. P. 155–180.  
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of formation of remote sensing and sea truth databases for the monitoring of anthropogenic impact on ecosystems of coastal water areas // *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive ground-space monitoring of anthropogenic impact on russian black sea coastal water areas. Eds. K.V. Anisimov et al., *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*, 2018. P. 625–637.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
- Crude Accountability, 2013 (<https://crudeaccountability.org/wp-content/uploads/2013/05/20130506-HiddenInPlainSight.pdf>).
- Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., MacDonald I.R.* Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps // *Remote Sens. Environ.* 2017. 189. P. 96–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.003>

- Espedal H.A., Wahl T.* Satellite SAR oil spill detection using wind history information // *Int. J. Remote Sens.* 1999. 20. P. 49–65.  
<https://doi.org/10.1080/014311699213596>
- Etioppe G.* Seepage in Field Geology and Petroleum Exploration. Natural Gas Seepage. Cham: Springer International Publishing, 2015 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0_5).
- Fingas M.* The challenges of remotely measuring oil slick thickness // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 2. P. 319.  
<https://doi.org/10.3390/rs10020319>
- Geersen J., Scholz F., Linke P. et al.* Fault zone controlled seafloor methane seepage in the rupture area of the 2010 Maule Earthquake, Central Chile // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2016. 17. P. 4802–4813.  
<https://doi.org/10.1002/2016GC006498>
- ИТОПФ, 2015. Aerial observation of oil spills at sea. [https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation\\_ru.pdf](https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation_ru.pdf).
- Ivanov A. Yu., Gerivani H.* Oil leaking and seeping site in the Persian Gulf detected and studied by satellite observations // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020.  
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1853286>
- Ivanov A. Yu., Gerivani H., Evtushenko N.V.* Characterization of natural hydrocarbon seepage in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020. V. 38. № 5. P. 527–538.  
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1600175>
- Ivanov A. Yu., Morović M.* Oil seeps detection and mapping by SAR imagery in the Adriatic Sea // *Acta Adriatica.* 2020. V. 61(1). P. 13–26.  
<https://doi.org/10.32582/aa.61.1.1>
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology.* 2004. P. 53–58.
- Kennicutt M.C.* Oil and gas seeps in the Gulf of Mexico // *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: before the Deepwater Horizon oil spill: V. 1.* Ed. C.H. Ward. Springer, New York, 2017. P. 275–358.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_5)
- Klemas V.* Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // *J. Coastal Res.* 2010. V. 26. N 5. P. 789–797.  
<https://doi.org/10.2112/10A-00012>
- Kvenvolden K.A., Cooper C.K.* Natural seepage of crude oil into the marine environment // *Geo-Mar. Lett.* 2003. 23(3–4). P. 140–146.  
<https://doi.org/10.1007/s00367-003-0135-0>
- Leifer I.A.* Synthesis review of emissions and fates for the Coal Oil Point marine hydrocarbon seep field and California marine seepage // *Geofluids.* 2019. V. 2019. ID 4724587. 48 p.  
<https://doi.org/10.1155/2019/4724587>
- Link W.K.* Significance of oil and gas seeps in world oil exploration // *AAPG Bull.* 1952. V. 36. № 8. P. 1505–1540.
- Liungman O., Mattson J.* Scientific documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2011 (<https://stw-helcom.smhi.se.>)
- MacDonald I., Guinasso N., Ackleson S. et al.* Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. C9. P. 16351–16364.  
<https://doi.org/10.1029/93JC01289>
- MacDonald I.* Natural oil spills // *Sci. Am.* 1998. V. 279. P. 56–61.  
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican1198-56>
- MacDonald I., Garcia-Pineda O., Beet A. et al.* Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 12. № 120. P. 8364–8380.  
<https://doi.org/10.1002/2015JC011062>
- Najoui Z., Riazanoff S., Deffontaines B., Xavier J.-P.* Estimated location of the seafloor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico // *Mar. Pet. Geol.* 2018. V. 91. P. 190–201.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>
- NOAA, 2016. Open water oil identification job aid for aerial observation with standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes. Office of Response and Restoration, Ver. 3. ([https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA\\_2016.pdf](https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA_2016.pdf)).
- Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. The National Academies Press, Washington, 2003.
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science.* 2018. V. 14. № 1. P. 87–103.  
<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Schumacher D.* Pre-drill prediction of hydrocarbon charge: microseepage-based prediction of charge and post-survey drilling results / AAPG International Conference and Exhibition, Oct. 23–26, 2011, Milan, Italy ([https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx\\_schumacher.pdf.htm](https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx_schumacher.pdf.htm)).
- Sun S., Hu C., Garcia-Pineda O. et al.* Remote sensing assessment of oil spills near a damaged platform in the Gulf of Mexico // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. V. 136. P. 141–151.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.004>
- Vasilev A., Tsekov M., Petsinski P. et al.* New possible earthquake precursor and initial area for satellite monitoring // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 8. ID 586283.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.586283>