

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ ПРОЯВЛЕНИЙ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. В. Г. Бондур^{1, *}, В. Н. Черникова¹, В. В. Замшин¹

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,
Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 19.03.2025 г.

На основании результатов космического мониторинга с использованием многоспектральных спутниковых данных выявлены и исследованы 180 случаев проявлений грязевулканических флюидов (ГВФ) на морской поверхности и в приповерхностном слое Каспийского моря в районе Челекено-Ливановской поднятий за период времени с 2019 по 2021 годы. Для областей проявлений ГВФ проанализированы отражательные способности в 7-ми спектральных каналах аппаратуры спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B в диапазоне длин волн 0.44–2.2 мкм. В областях проявлений ГВФ на морской поверхности выявлены значимые положительные контрасты в “фиолетовом” (~0.44 мкм), “синем” (~0.48 мкм) и “зеленом” (~0.56 мкм) спектральных каналах, обусловленные наличием взвешенных веществ и пузырьков газа в приповерхностном слое водной толщи. Математические ожидания контрастов Вебера в этих спектральных каналах варьировались в диапазоне от $C \sim 0.47$ до $C \sim 0.77$. На основании комплексного анализа пространственно-геометрических характеристик проявлений ГВФ и батиметрической карты района установлены координаты источников выбросов, которые соответствовали вершине грязевулканической банки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, грязевулканические флюиды, многоспектральные спутниковые изображения, спектральная отражательная способность

DOI: 10.31857/S0205961425020032, **EDN:** EJIMBZ

ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм является распространенным геологическим явлением в морях и океанах (Холодов, 2012). Выделяются островные и подводные грязевые вулканы (Алиев, 2006 (б)). Извержения грязевых вулканов способствуют процессам дефлюидизации литосферы, которые протекают в разломных зонах земной коры (Ершов, 2015). Обычно грязевые вулканы или сопки группируются в областях с хорошо выраженными и характерными для них особенностями стратиграфии и тектоники, распространение которых совпадает с крупными осадочно-породными бассейнами и газонефтяными залежами (Холодов, 2019).

В результате морской грязевулканической деятельности могут образовываться острова, банки, мели и подводные хребты. Грязевые вулканы, как правило, могут представлять собой конусовидные образования, размеры которых колеблются в широких пределах (Холодов, 2012). В Каспийском море наиболее крупными размерами отличаются грязевые вулканы у побережья Азербайджана. В этом регионе грязевые вулканы Туорогай,

Большой и Малый Кянизадаг, Дашгиль, Калмас и др. образуют объекты, сопоставимые с горами (Шнюков и др., 2017; Алиев, 2006 (а)). Вершины грязевулканических конусов могут принимать вид площадок — кальдер. На вершинах могут находиться многочисленное количество салз и дополнительных конусообразных форм, которые способны к непрерывным извержениям грязи, воды, нефти и газовых флюидов (Шнюков и др., 2017). Продукты выноса грязевого вулканизма принимают участие в формировании микрорельефа окружающих участков дна моря, влияют на его динамику и состав донных осадков (Алиев, 2006 (а, б)).

В южной части Каспийского моря грязевые вулканы расположены в нескольких тектонических зонах: Абшероно-Прибалханский прогиб; Бакинский архипелаг; вулканы Туркменской структурной террасы; Приэльбрусский прогиб; глубоководная зона Южного Каспия (Алиев, 2006 (а)). Всего в южной части Каспийского моря зарегистрировано около 190 грязевых вулканов (Шнюков и др., 2017). А в мире насчитывается около 1000 грязевых вулканов на суше и 1400 под водой (Холодов, 2019).

Необходимо отметить, что мониторинг грязевулканической деятельности с судов является трудоемким и затратным процессом (Аэрокосмический..., 2012). Тогда как применение методов и технологий космического мониторинга для решения этой задачи представляется перспективным (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2015). Это связано с тем, что спутниковые средства дистанционного зондирования Земли обеспечивают регулярное получение данных об исследуемых объектах, процессах и явлениях, характеризуются широким пространственным охватом, возможностью работы в любых труднодоступных регионах, широким спектром регистрируемых значимых параметров морской поверхности и водной среды (Бондур, 2010).

Спутниковые исследования выбросов грязевулканических флюидов (далее ГВФ) и получение новых знаний о них представляются важными, в том числе для разведки и добычи углеводородов, выявления загрязнения водной среды, для обеспечения безопасности судоходства и функционирования морских нефтегазовых промыслов и их инфраструктуры, предупреждения чрезвычайных ситуаций в морских акваториях и др. (Аэрокосмический..., 2012; Бондур, 2010; Богоявленский, 2015).

Мониторинг извержений подводных грязевых вулканов с использованием спутниковых данных оптического диапазона основан на регистрации значимых параметров морской поверхности и приповерхностного слоя моря (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2015). Изменение оптических характеристик толщи морской среды проявляется в изменении цвета воды, увеличении и уменьшении мутности за счет изменения рассеяния света вследствие изменения концентраций взвешенных веществ, наличия пузырьков, а также за счет изменения поглощения света из-за вариаций концентрации поглощающего растворенного вещества (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2015; Бондур и др., 2006(б), 2007). Аномалии пространственно-временной структуры морского волнения, связанные с изменением гидрофизических характеристик водной среды, в том числе, вследствие поступления грязевулканических флюидов, могут регистрироваться спутниковыми оптическими и радиолокационными средствами (Бондур, 2010; Бондур и др., 2007, 2009; Иванов и др., 2007).

Спутниковым исследованиям ГВФ посвящены немногочисленные работы.

В работе (Бондур, Кузнецова, 2015) было показано, что с помощью оптических спутниковых методов возможно регистрировать ареалы распространения взмученных осадков, представленных мелкодисперсной грязью и газом, выделяющихся из грязевулканических образований.

В статье (Лаврова и др., 2021) по данным оптической космической многоспектральной съемки исследована активизация грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море, происходившая 4 июля 2021 года. В результате анализа спутниковых данных, полученных до и после активизации грязевого вулкана, обнаружилось, что площадь острова увеличилась в 2.4 раза.

В работе (Матросова и др., 2022) были рассмотрены и систематизированы некоторые характеристики нефтегазопоявлений на морской поверхности, такие как: форма и размеры, особенности дрейфа, продолжительность существования, а также проанализирована их связь с эруптивными структурами морского дна и др. В статье приведены примеры обнаружения нефтегазопоявлений на поверхности Каспийского моря по данным спутниковой радиолокационной и оптической съемки.

Также можно отметить наличие работ, посвященных обнаружению ГВФ по данным судовых измерений. Например, в работе (Fallati et al., 2023) использовался комплексный метод обнаружения ГВФ, основанный на многолучевом гидроакустическом сканировании рельефа дна. Получена информация о бентосных сообществах в пределах грязевулканической структуры, а также исследована их взаимосвязь с морфологией рельефа и активностью просачивания ГВФ.

Отметим также, что в ходе научной экспедиции у континентальной окраины Макран у берегов Пакистана, описанной в работе (Wu T et al., 2021), были получены сейсмические профили и многолучевые батиметрические данные. С их помощью было обнаружено 12 грязевых вулканов, некоторые из которых были активны. В результате этого исследования была выдвинута гипотеза о подпитке грязевых вулканов отложениями газовых гидратов, которые вносят дополнительный вклад в активность источников ГВФ.

Настоящая работа посвящена выявлению и исследованию по спутниковым оптическим многоспектральным данным особенностей выбросов ГВФ на примере участка в Каспийском море вблизи грязевулканической банки с высокой активностью, вершина которой находится на относительно небольшой глубине (~10–15 метров). Особое внимание уделяется исследованию спектральных кривых отражательной способности участков морской поверхности, характеризующихся проявлениями ГВФ.

ИССЛЕДУЕМЫЙ УЧАСТОК АКВАТОРИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Выбранный исследуемый участок (см. рис. 1) находится в пределах Апшерон-Прибалханской

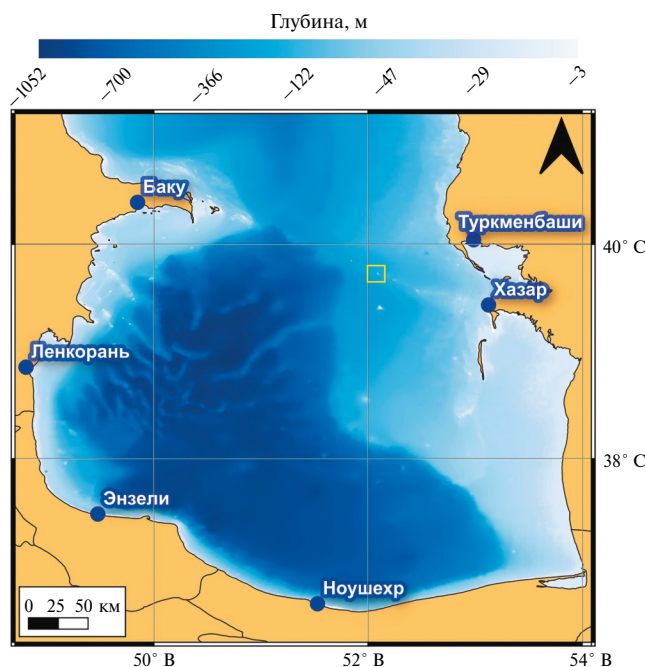


Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка акватории (желтый прямоугольник), наложенная на батиметрическую карту Каспийского моря.

системы поднятий примерно в 90 км к западу от полуострова Челекен и характеризуется локальной возвышенностью, именуемой банкой Ливанова (Соловьев, 1952). Эта Банка образовалась вследствие деятельности грязевого вулкана. Глубина моря вокруг банки составляла около 70 м (<https://www.navionics.com/>).

Каспийское море считается одной из акваторий, характеризующейся подходящими условиями для формирования нефтегазонакоплений, а также интенсивными нефте- и газопроявлениями (Дмитриевский и др., 1999; Черкашин и др., 2018). Особенностью Каспийского региона является относительно высокая сейсмичность, которая является фактором, способствующим развитию геодинамических процессов. Эти процессы наряду с другими факторами создают благоприятные условия для миграции и высвобождения природных углеводородов. Южно-Каспийская впадина является одной из самых активных зон в Каспийском море, которая характеризуется, как район разгрузки углеводородов и функционирования подводных источников — грязевых вулканов (сальз), грифонов, газовых гидратов (Алиев, 2006(а)).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 2 приведена обобщенная схема проведения исследования. На этой схеме исходные дан-

ные обозначены розовыми параллелограммами, формируемые результаты — зелеными параллелограммами, а основные выполняемые операции — синими прямоугольниками. Стрелками показаны потоки данных.

В качестве основных исходных данных использованы безоблачные спутниковые оптические многоспектральные изображения (331 шт.), полученные в 2019–2021 гг. с борта спутников Landsat-8 (Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, 2019) и Sentinel-2A/B (Sentinel-2 User Handbook, 2015), которые обозначены розовыми параллелограммами на рис. 2.

Уровень обработки использованных спутниковых изображений — 2А (калиброванная спектральная отражательная способность объекта подстилающей поверхности). Изображения были получены с помощью Интернет-портала сбора и обработки пространственных данных Google Earth Engine (GEE). В качестве дополнительных исходных данных использовались также батиметрическая карта (<https://webapp.navionics.com/>) и информация о течениях в исследуемой акватории (Гидрометеорология..., 1992).

С использованием отобранных изображений оператором-дешифровщиком выполнялось интерактивное выявление и оконтуривание участков морской поверхности (МП) с проявлениями грязевулканических флюидов, а также регистрация информативных параметров ГВФ. В результате формировались контуры зон ГВФ в векторном формате (всего 180 контуров, из них 112 выделено по данным, полученным с Sentinel-2A/B, а 68 — по данным, полученным с Landsat-8). В качестве информативных параметров регистрировались осредненные по площади значения спектральной отражательной способности в 7-ми спектральных каналах для зон проявления ГВФ и фоновой МП (см. рис. 2).

При этом использовались данные из 7-ми совместимых по длинам волн спектральных каналов оптической многоспектральной аппаратуры спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B, а именно:

- фиолетовый, каналы № 1 спутника Landsat-8 (разрешение — 30 м) и № 1 спутников Sentinel-2A/B (разрешение — 60 м);
- синий, каналы № 2 спутника Landsat-8 (30 м) и № 2 спутников Sentinel-2A/B (10 м);
- зеленый, каналы № 3 спутника Landsat-8 (30 м) и № 3 спутников Sentinel-2A/B (10 м);
- красный, каналы № 4 спутника Landsat-8 (30 м) и № 4 спутников Sentinel-2A/B (10 м);
- ближний ИК, каналы № 5 спутника Landsat-8 (30 м) и № 8А спутников Sentinel-2A/B (20 м);

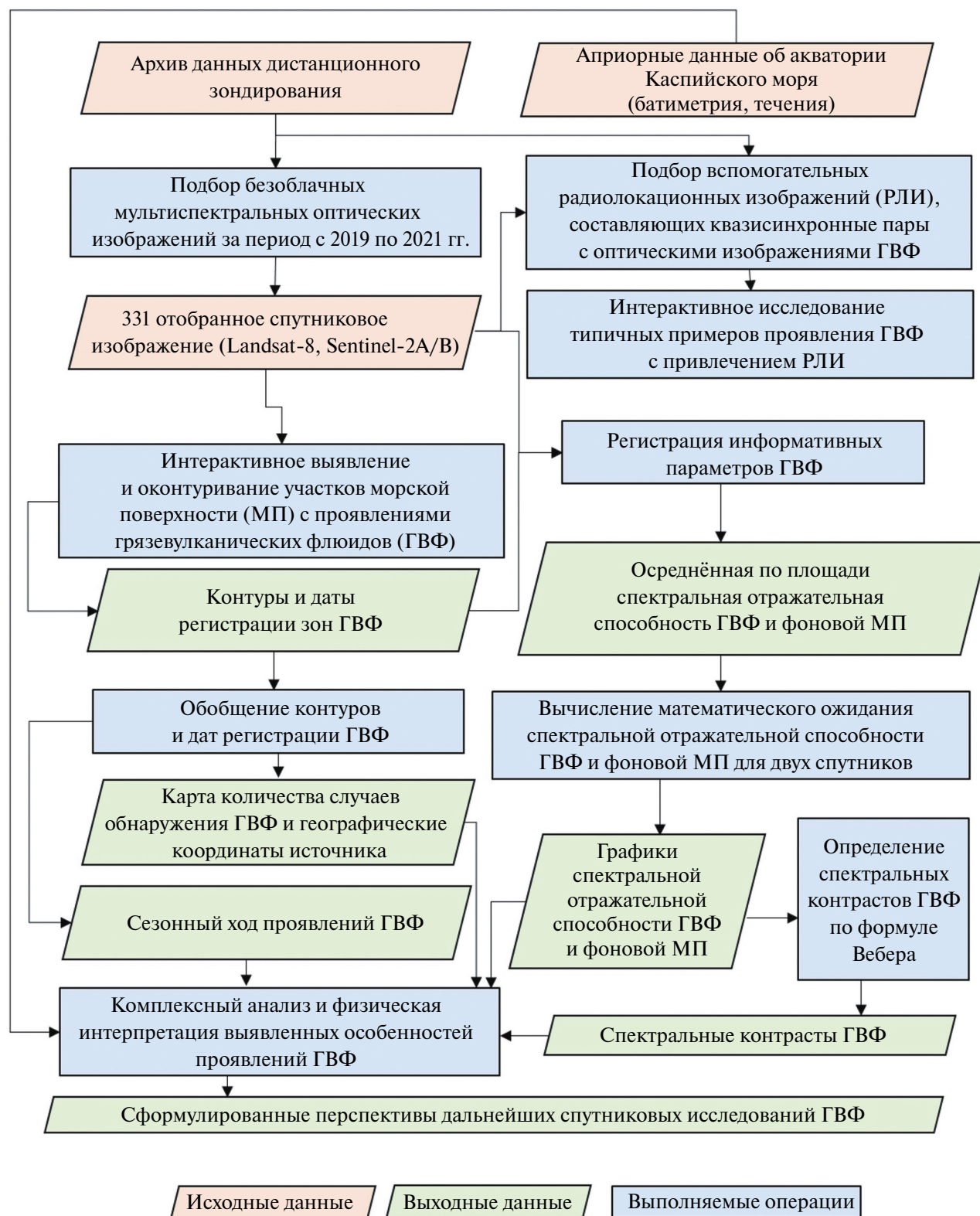


Рис. 2. Обобщенная схема проведения исследований.

– средний ИК1, каналы № 6 спутника Landsat-8 (30 м) и № 11 спутников Sentinel-2A/B (20 м);

– средний ИК2, каналы № 7 спутника Landsat-8 (30 м) и № 12 спутников Sentinel-2A/B (20 м).

Совместимость вышеперечисленных каналов демонстрируется на рисунке 3, на котором приведена диаграмма спектральных каналов съемочной аппаратуры спутников Landsat-8 (аппаратура OLI, красные прямоугольники) и Sentinel-2A/B (аппаратура MSI, зеленые прямоугольники). Совместимые каналы отмечены утолщенными контурами.

Кроме того, для исследования физических особенностей проявления ГВФ на морской поверхности использовались и анализировались 2 радиолокационных изображения (см. рисунок 2), полученных со спутников Sentinel-1A/B в формате GRD (Vincent, 2020). Эти радиолокационные изображения подобраны таким образом, чтобы они составляли квазисинхронные пары с оптическими изображениями с проявлениями ГВФ. По этим изображениям изучались признаки проявления ГВФ, обнаруженных на соответствующих им оптических изображениях.

Далее выполнялось обобщение контуров зон проявления ГВФ в геоинформационной системе (ГИС) QGIS. В результате этого обобщения формировалась карта количества случаев регистрации проявлений ГВФ и определялись географические

координаты источника интенсивных ГВФ. Также анализировался сезонный ход случаев регистрации проявлений ГВФ.

Кроме того, вычислялось математическое ожидание спектральной отражательной способности ГВФ и фоновой МП в каждом из 7-ми каналов для объединенного массива данных, полученных с двух спутников (Landsat-8 и Sentinel-2A/B).

Полученные результаты представлялись в виде графиков спектральной отражательной способности зон проявления ГВФ и фоновой МП, после чего определялся спектральный контраст зон проявления ГВФ с использованием формулы Вебера (1) (Peli, 1990).

$$C = \frac{R_{\text{ГВФ}} - R_{\text{МП}}}{R_{\text{МП}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ГВФ}}$ – спектральная отражательная способность участка МП в зоне проявления ГВФ; $R_{\text{МП}}$ – спектральная отражательная способность фоновой МП (зона фоновой МП выбиралась оператором интерактивно при дешифрировании изображений для каждого случая регистрации ГВФ).

На заключительном этапе исследования с учетом полученных разнородных выходных данных (см. рис. 2, зеленые параллелограммы) выполнялась процедура комплексного анализа и физической интерпретации особенностей проявлений ГВФ.

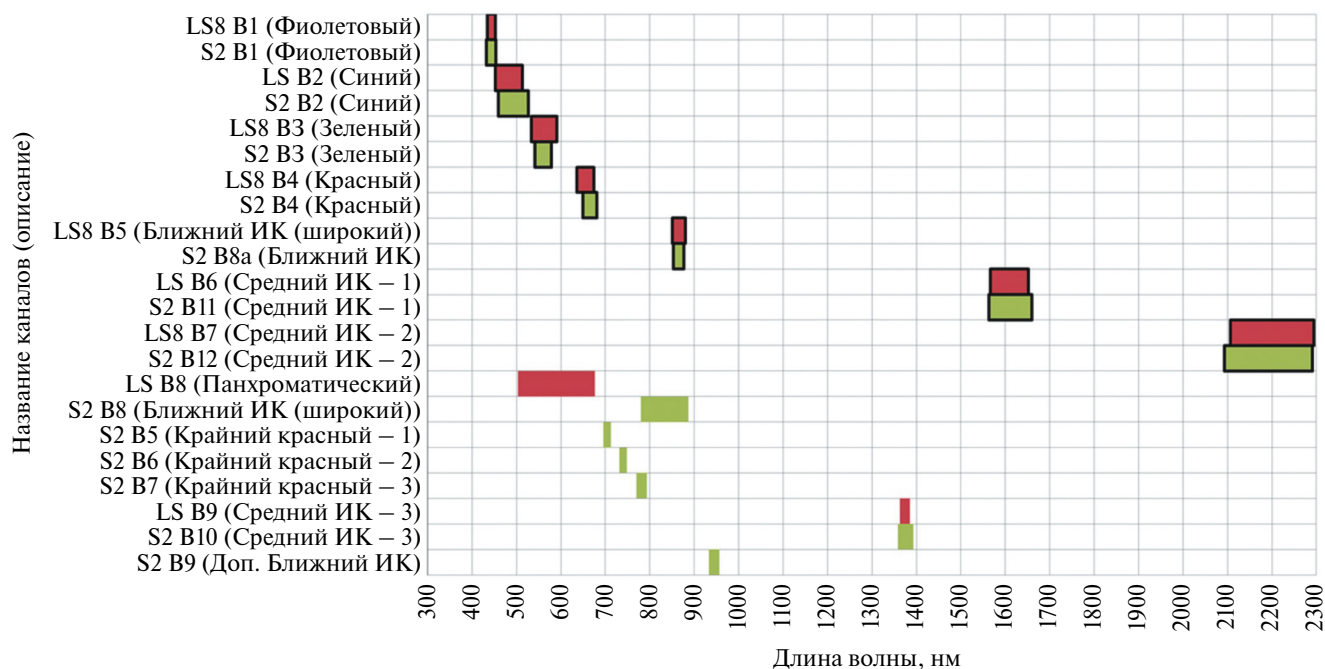


Рис. 3. Диаграмма соответствия длин волн спектральных каналов съемочной аппаратуры спутников Landsat-8 (аппаратура OLI, красные прямоугольники) и Sentinel-2A/B (аппаратура MSI, зеленые прямоугольники). Соответствующие друг другу каналы отмечены утолщенными контурами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Примеры спутниковых изображений ГВФ и их анализ

На рис. 4а приведены примеры спутниковых многоспектральных изображений (аппаратура MSI спутников Sentinel-2A/B, синтез в натуральных цветах, уровень 2A) участков морской поверхности проявлениями ГВФ.

Обнаруженные ГВФ располагались в пределах участка Каспийского моря, показанного на рис. 1, в 65 км северо-западнее от г. Туркменбаши. Как уже отмечалось выше, этот район относится к Абшерон-Прибалханской зоне поднятий, где сосредоточены наиболее нефтегазопродуктивные отложения (Юсубов, Гулиев, 2022).

На рис. 4б приведены примеры графиков профилей спектральной отражательной способности, построенные по данным “красного”, “зеленого”, “синего” каналов (RGB). Линии, вдоль которых построены профили, показаны красным цветом на рис. 4а.

Как видно из сопоставительного анализа рис. 4а и 4б, зоны проявления ГВФ характеризуются существенно повышенными (по сравнению с фоном) значениями спектральной отражательной способности в синем и зеленом каналах видимого диапазона спектра электромагнитных волн. Несколько менее значимые контрасты регистрируются в красном канале. Обнаруженные оптические неоднородности согласуются

с дешифровочным признакам грезевых и газовых выбросов и свидетельствуют о наличии зон повышенной мутности и большого количества пузырьков газа (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2015). Преимущественно вытянутая форма зон проявления ГВФ и вихреобразная структура свидетельствуют об увлечении выбрасываемых газов и взвесей турбулентными течениями (Бондур и др., 2006(а)). Более подробный анализ спектральных особенностей ГВФ в 7-ми каналах используемой спутниковой аппаратуры будет проведен ниже.

На рис. 5 приведены примеры совместного анализа квазисинхронных оптических (Sentinel-2A/B, цветные фрагменты) и радиолокационных (Sentinel-1A/B, фрагменты в градациях серого) космических изображений ГВФ (а–б) и нефтяных сипов (в–е), выявленных ранее в работе (Матросова и др., 2022).

Анализ рис. 5 показывает, что выявляемые в настоящем исследовании ГВФ (показаны на рис. 5а, б), в отличие, например, от нефтепроявлений (показаны на рис. 5в, г, д, е), не сопровождаются отрицательными аномалиями удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на радиолокационных спутниковых изображениях. Анализ рис. 5 свидетельствует о том, что выявленные по спутниковым оптическим данным проявления ГВФ не оказывают значимого влияния на УЭПР морской поверхности. На рисунке 5в, г, д, е показаны квазисинхронные изображения нефтепроявлений (разница во времени 1–3 суток),

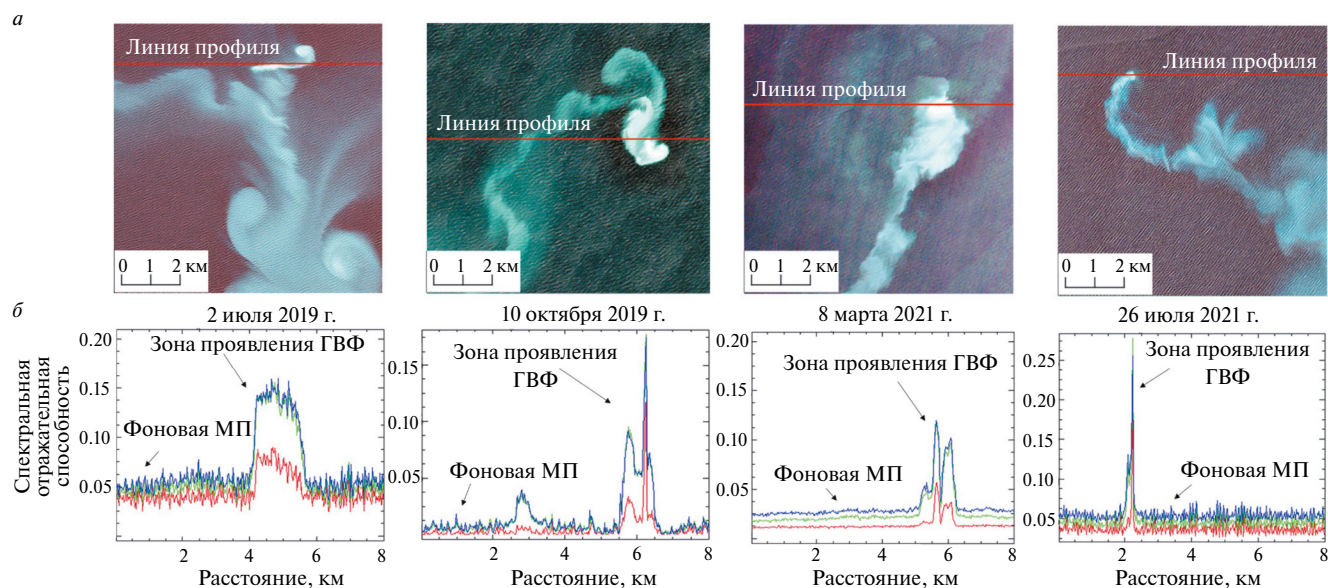


Рис. 4. а – примеры спутниковых многоспектральных изображений (синтез в натуральных цветах – RGB) участков морской поверхности с проявлениями ГВФ; б – профили спектральной отражательной способности, построенные по данным “красного”, “зеленого”, “синего” каналов.

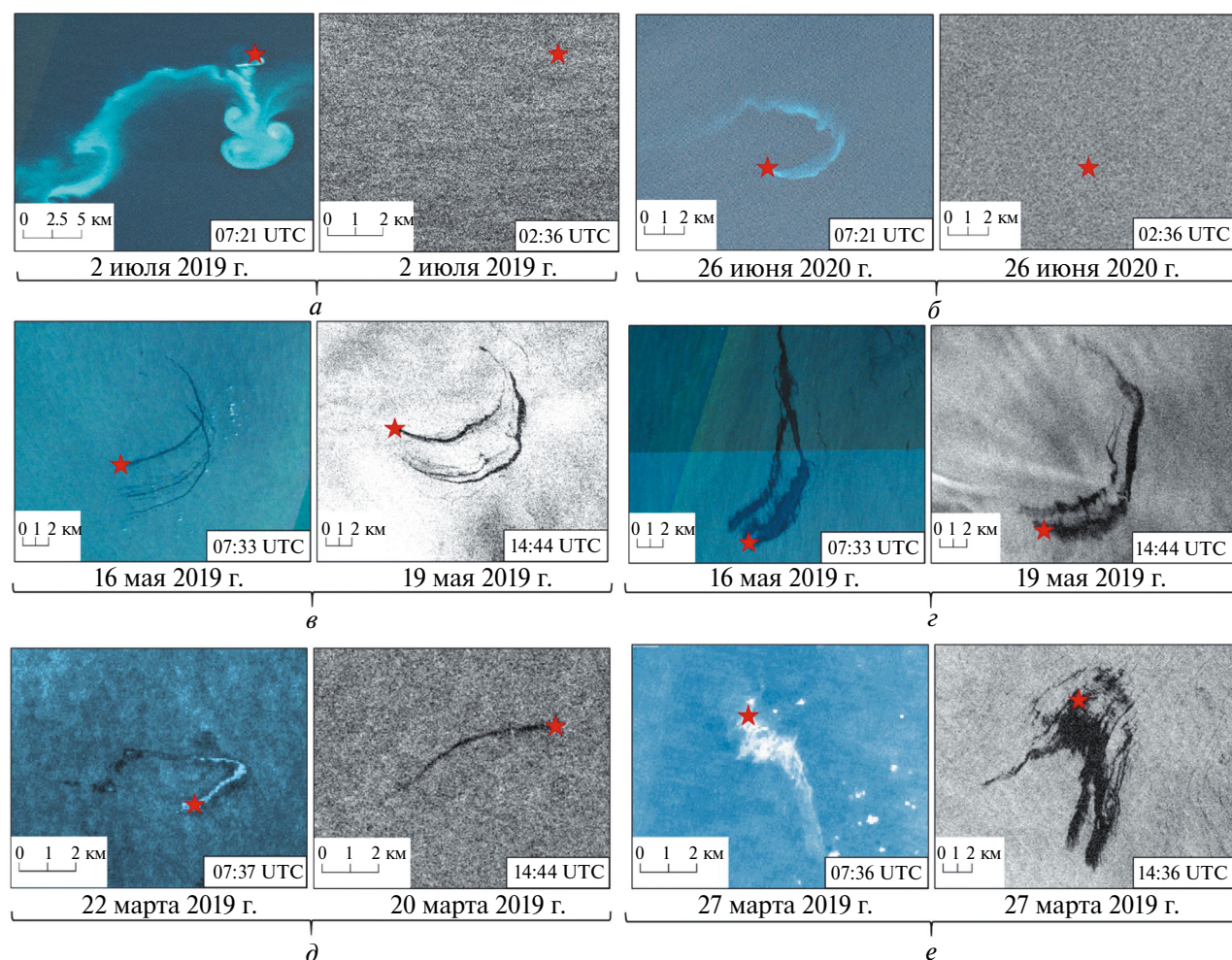


Рис. 5. Примеры совместного анализа квазисинхронных оптических (Sentinel-2A/B, цветные фрагменты) и радиолокационных (Sentinel-1A/B, фрагменты в градациях серого) космических изображений ГВФ (а–б) и нефтяных slickов (в–е), выявленных в работе (Матросова и др., 2022).

выявленные в работе (Матросова и др., 2022) на расстоянии ~50 км от исследуемого района проявления ГВФ. На этих рисунках отчетливо видны сопоставимые по пространственно-геометрическим характеристикам участки морской поверхности, подверженные нефтепроявлениям, выявленные как по оптическим, так и по радиолокационным спутниковым изображениям.

Анализ рис. 5 наглядно показывает, что в отличие от нефтепроявлений, которые могут выявляться как в оптическом, так и в радио-диапазонах спектра электромагнитных волн (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012; Иванов, 2007), ГВФ в нашем случае наблюдались только в оптическом диапазоне. Это свидетельствует о том, что обнаруженные ГВФ локализуются преимущественно в приповерхностном слое морской среды, распространяются вместе с течениями в виде шлейфов/плюмов, постепенно рассеиваются и не оказывают

существенного влияния на морскую поверхность, не вызывая контрастов в поле отраженного радиолокационного сигнала.

Обобщение контуров ГВФ и их анализ

На рис. 6а, б, в приведены результаты обобщения контуров зон проявления ГВФ (за период наблюдения с 2019 по 2021 г.), а также цветокодированные карты количества случаев наблюдения ГВФ (см. рис. 6д, е) и карта глубин в области исследования (см. рис. 6з).

Как следует из анализа рис. 6, зона высоких значений количества случаев наблюдения ГВФ (от 30 до 180 случаев) локализована около точки с координатами 39°43'53" с.ш. 52°04'48" в.д. (см. рис. 6е). При этом совместный анализ рис. 6з и рис. 6б, в, д, е показывает, что зона, в которой часто встречались проявления ГВФ, локализована у вершины гря-

зевулканической банки, вблизи которой глубины резко уменьшаются с 70 до 10 м.

Из анализа рис. 6б, в, д, е следует, что ГВФ распространяются преимущественно на юг и юго-восток, реже — на юго-запад и восток, а наиболее редкими являются северные румбы направления распространения ГВФ. Справедливо предположить, что обобщенная картина распространения ГВФ определяется преимущественно циркуляцией вод в Каспийском море, которая зависит от водостока и ветра. Известно (Гидрометеорология..., 1992), что большая часть водостока приходится на Северный Каспий. С севера водные массы движутся на юг, разделяясь и циркулируя в центральной части, оказывая влияние на наблюдаемые в настоящем исследовании процессы распространения плюма ГВФ.

Сезонные особенности проявлений ГВФ

На рис. 7 приведены графики распределения по месяцам количества спутниковых изображений и случаев регистрации ГВФ за период времени

с 2019 по 2021 годы. Из анализа рис. 7а, б, в видно, что на протяжении трех лет, в течение которых проводился мониторинг, количество безоблачных съемок в каждый месяц варьировалось преимущественно в диапазоне 8–10, иногда снижаясь до 7 или увеличиваясь до 11. При этом, количество случаев регистрации проявлений ГВФ неравномерно распределялось по сезонам года и колебалось от 0–1 (см., например, январь 2020 г.) до 9–10 (см., например, август 2021 г.).

На рис. 7г показаны графики сезонного хода количества случаев обнаружения ГВФ, выраженного в процентах от количества съемок (условно — вероятность регистрации ГВФ). Анализ рис. 7г показывает, что в течение трех лет (с 2019 по 2021 годы) наблюдалась в целом схожая картина распределения по месяцам года вероятности регистрации ГВФ. С мая по октябрь вероятность регистрации ГВФ принимала значения в диапазоне 60–100%. В другие месяцы года вероятность регистрации ГВФ колебалась в диапазоне 0–60%.

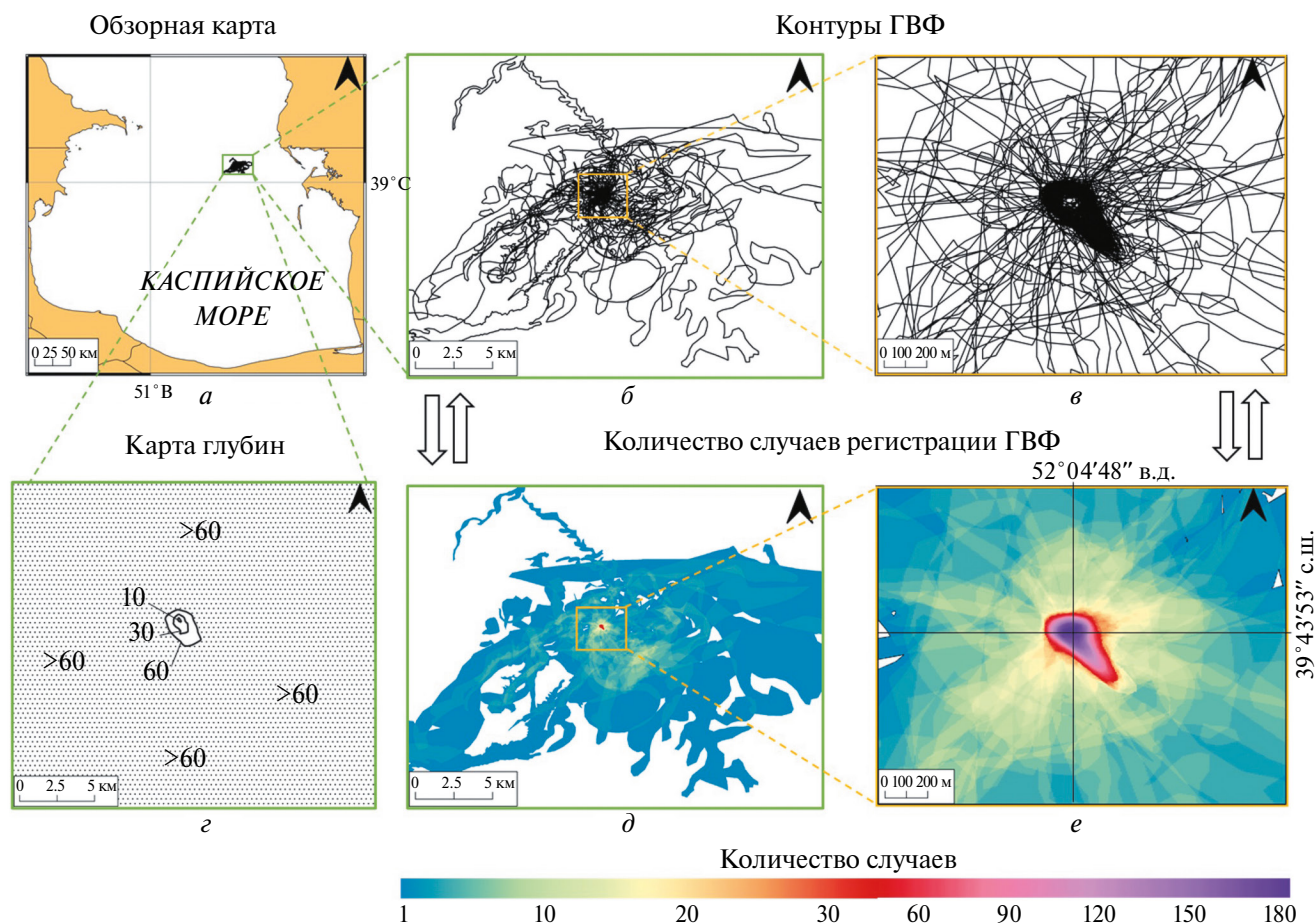


Рис. 6. а — Обзорная карта южной части Каспийского моря с выделенным участком исследования и обнаруженными обобщенными контурами ГВФ; б, в — карты контуров выявленных ГВФ в увеличенном масштабе и соответствующие им цветокодированные карты количества случаев наблюдения ГВФ (д, е); з — карта глубин в области исследования (глубины изобат отмечены числами от 10 до 60 (м)).

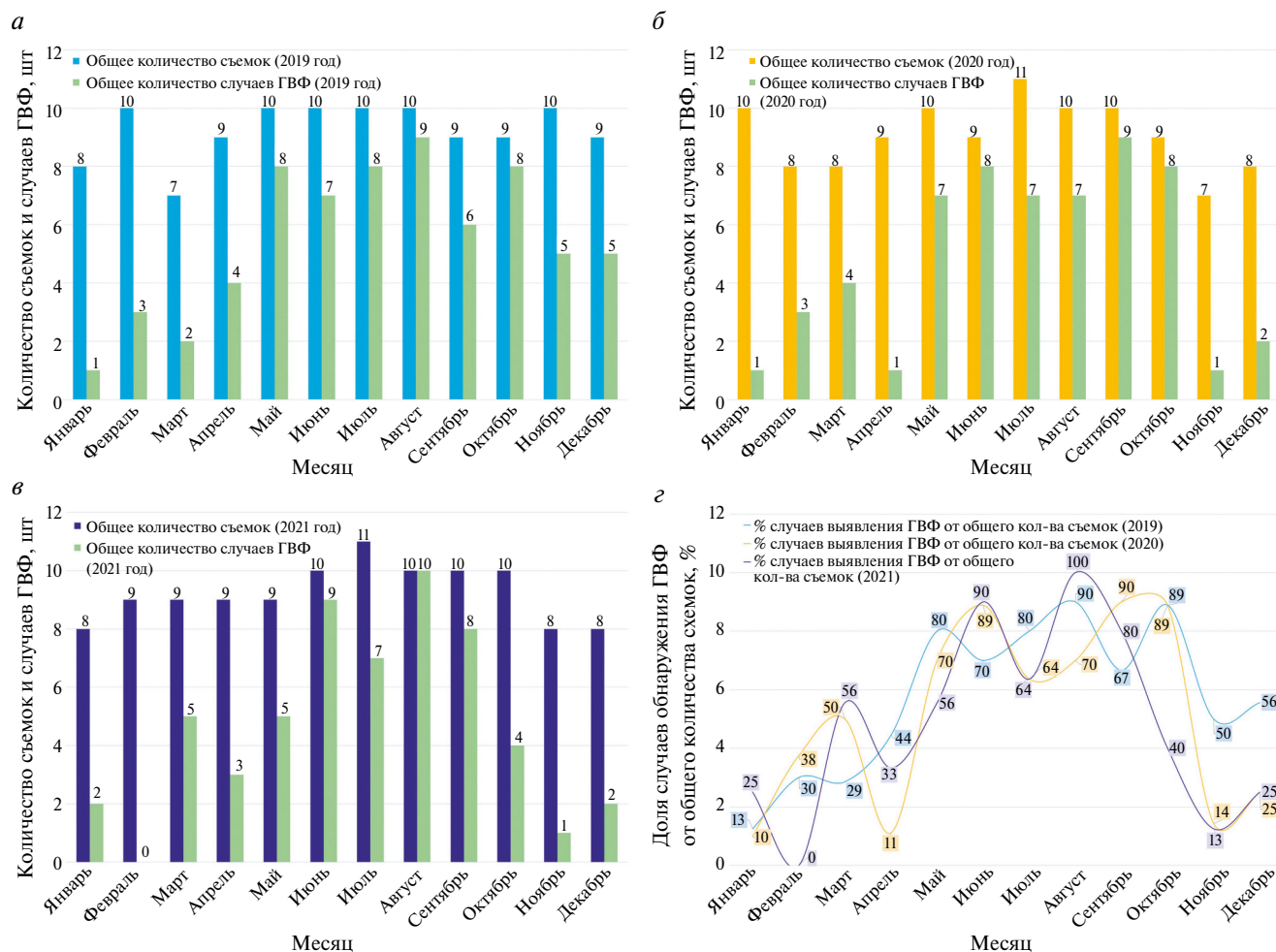


Рис. 7. Графики распределения по месяцам (с 2019 по 2021 годы): а–в – количества спутниковых изображений и случаев регистрации ГВФ; г – количества случаев обнаружения ГВФ, выраженного в процентах от количества съемок.

В числе возможных факторов, которые могут влиять на сезонный ход вероятности регистрации проявлений ГВФ, можно отметить: прогрев водной толщи и морской поверхности в летний период времени (Яицкая, 2017), что сказывается на высвобождении ГВФ (Шнюков и др., 2017); сезонное изменение ветровых условий, способствующих поднятию глубинных вод на поверхность (Гидрометеорология..., 1992) и др. Особенности сезонного хода проявлений ГВФ в Каспийском море могут быть предметом дальнейшего изучения.

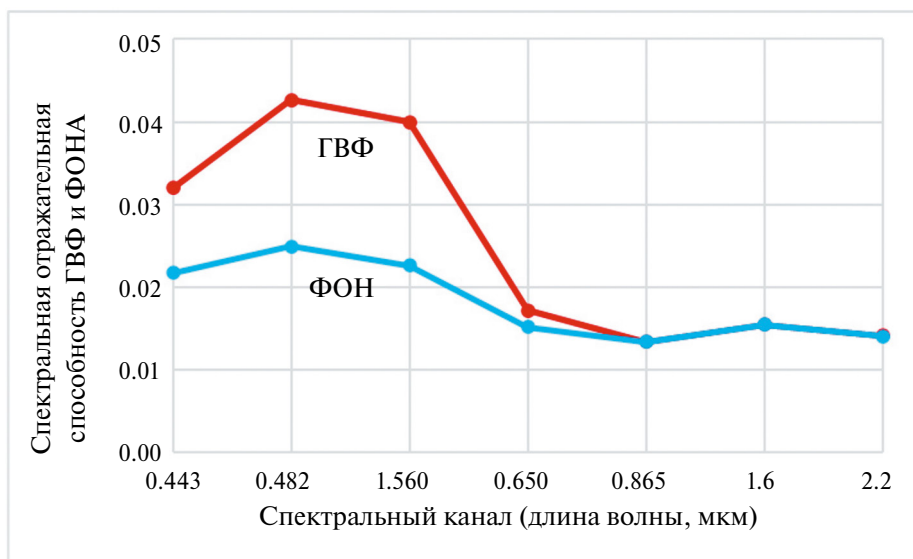
Спектральная отражательная способность зон проявления ГВФ и фоновой морской поверхности

На рис. 8 приведены результаты обобщения данных о спектральной отражательной способности зон проявления ГВФ ($R_{\text{ГВФ}}$) и фоновой морской поверхности ($R_{\text{мп}}$), полученные в семи спектральных каналах по результатам совместной обработки данных аппаратуры спутников Sentinel-2A/B (112 сцен)

и Landsat-8 (68 сцен). На рис. 8а показаны графики математических ожиданий спектральной отражательной способности зон проявления ГВФ (красная линия) и фоновой морской поверхности (синяя линия). На рис. 8б показан график изменения контраста ГВФ в зависимости от используемого спектрального канала (длины волны).

Совместный анализ графиков, приведенных на рис. 8а, б, показал, что ГВФ отличаются от фоновой морской поверхности значительно более высокими значениями спектральной отражательной способности на длинах волн 0.443, 0.482 и 0.560 мкм (фиолетовый, синий и зеленый каналы). Для фиолетового (0.443 мкм), синего (0.482 мкм) и зеленого (0.560 мкм) спектральных каналов величины контрастов Вебера, вычисляемые по формуле (1), составили $C_{0.44\text{мкм}} \sim 0.47$, $C_{0.48\text{мкм}} \sim 0.71$ и $C_{0.56\text{мкм}} \sim 0.77$ соответственно. При дальнейшем увеличении длины волны контрасты существенно падали

a



б

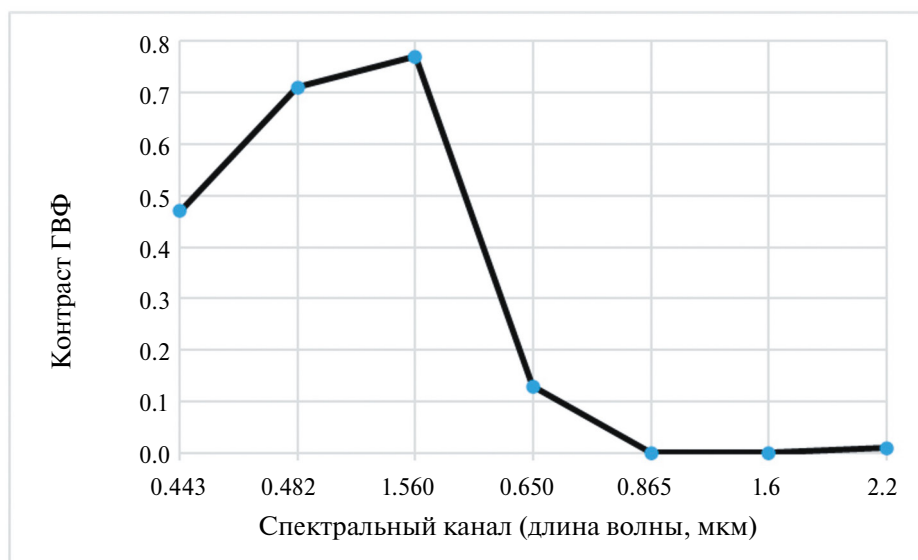


Рис. 8. *a* – Графики математических ожиданий спектральной отражательной способности зон проявлений ГВФ (красная линия) и фоновой морской поверхности (синяя линия), полученные по результатам совместной обработки данных аппаратуры спутников Sentinel-2A/B (112 сцен) и Landsat-8 (68 сцен); *б* – график изменения контраста ГВФ в зависимости от используемого спектрального канала.

($C_{0.65\text{мкм}} \sim 0.13$) и становились близкими к нулю ($C_{0.86\text{мкм}} \sim C_{1.6\text{мкм}} \sim C_{2.2\text{мкм}} < 0.1$), см. рис. 8б.

Выявленные значимые положительные контрасты ГВФ в видимом участке спектра электромагнитных волн объясняются наличием в приповерхностном слое воды выносимых и взмучиваемых глинистых и песчаных масс, а также пузырьков газа. Это влияет на рассеяние оптического излучения в водной толще, см., например, (Ерлов, 1970; Al-Lashi, Gunn, Czerski, 2016; Zhang, Lewis, Johnson, 1998).

Взвешенные вещества, находящиеся в приповерхностном слое водной толщи, существенно влияют на ее спектральную отражательную способность, регистрируемую спутниковыми оптическими системами (Бондур, 2010; Бондур и др., 2006 (б), 2007). Благодаря этому были разработаны, в том числе, алгоритмы восстановления концентрации взвесей различного типа по данным спутниковой многоспектральной съемки, например, (Kopelevich, 2002). Глубина проникновения оптического электромагнитного излучения в водную толщу сни-

жается с увеличением длины волны (Ерлов, 1970), в связи с чем плюмы ГВФ оказывают значительное влияние на спектральную отражательную способность моря в фиолетовом, синем и зеленом каналах. В красном канале это влияние незначительно, а в более длинноволновых каналах влияние практически отсутствует (см. рис. 8).

Характер изменения спектрального контраста плюмов ГВФ определяется, в том числе, оптическими свойствами приповерхностного слоя моря в присутствии пузырьков газа. Некоторые особенности обратного рассеяния оптического излучения в водной толще в присутствии пузырьков газа рассматривались в ряде работ. Например, в работе (Zhang, Lewis, Johnson, 1998) показано, что наличие пузырьков в приповерхностном слое изменяет цвет океана, усиливая сине-зеленые оттенки в результате увеличения рассеяния в диапазоне длин волн в пределах от 440 до 550 нм, что согласуется с результатами, полученными в настоящем исследовании (см. рис. 8а, б). При этом особенности изменения спектральной отражательной способности приповерхностного слоя в присутствии газовых пузырьков зависят от их размеров и других факторов (Al-Lashi, Gunn, Czerski, 2016). В том числе, вклад в обратное рассеяние возрастает, если пузырьки покрыты органической пленкой. Например, при толщине пленки 0.1 мкм и среднем радиусе пузырьков (50 мкм), обратное рассеяние может увеличиться в 4 раза (Zhang, Lewis, Johnson, 1998). Пузырьки газа в процессе поднятия со дна могут увеличиваться (с увеличением радиуса пузырьков происходит уменьшение их количества), что усиливает рассеяние оптического излучения (Stramski, 1994).

С учетом вышеизложенного, полученные спектральные характеристики морской поверхности в условиях проявления ГВФ представляются правдоподобными и объяснимыми с физической точки зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что грязевой вулканизм является распространенным явлением в морях и океанах, при этом такие явления изучены относительно мало. Спутниковые методы дистанционного зондирования Земли позволяют получать сведения об особенностях процессов активизации грязевых вулканов путем регистрации различных значимых параметров поверхности и приповерхностного слоя моря в зонах выбросов грязевулканических флюидов — взвесей осадочных пород и пузырьков газа.

В настоящей работе по спутниковым оптическим многоспектральным данным исследованы

особенности выбросов грязевулканических флюидов (ГВФ) на примере участка в Каспийском море (Челекено-Ливановская зона поднятий) вблизи активной грязевулканической банки. На основании результатов обработки и анализа более трехсот оптических многоспектральных изображений, полученных оптической аппаратурой спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B за период времени с 2019 по 2021 годы, зарегистрированы 180 случаев выбросов ГВФ в приповерхностный слой моря.

Проанализированы величины спектральной отражательной способности морской поверхности в областях выбросов ГВФ и на участках фоновой морской поверхности в 7-ми спектральных каналах аппаратуры спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B в диапазоне длин волн 0.44–2.2 мкм. Выявлены значимые положительные контрасты плюмов ГВФ в “фиолетовом” (~0.44 мкм), “синем” (~0.48 мкм) и “зеленом” (~0.56 мкм) спектральных каналах. Математические ожидания контрастов Вебера в этих спектральных каналах составили величины $C_{0.44\text{мкм}} \sim 0.47$, $C_{0.48\text{мкм}} \sim 0.71$ и $C_{0.56\text{мкм}} \sim 0.77$. Выявленные спектральные особенности ГВФ могут представлять интерес для дальнейших исследований проявлений грязевулканической активности в морских акваториях.

На основании комплексного анализа пространственно-геометрических характеристик зарегистрированных плюмов ГВФ и батиметрической карты района установлены координаты источника выбросов (39°43'53" с.ш. 52°04'48" в.д.), которые соответствовали вершине грязевулканической банки.

Выявленные в настоящем исследовании ГВФ, в отличие, например, от нефтепроявлений, не сопровождались отрицательными аномалиями УЭПР на радиолокационных спутниковых изображениях. Это свидетельствовало о том, что обнаруженные ГВФ локализируются преимущественно в приповерхностном слое морской среды, распространяются вместе с течениями в виде шлейфов/плюмов и постепенно рассеиваются, не оказывая существенного влияния на морскую поверхность. Это не вызывает появления контрастов в поле отраженного радиолокационного сигнала.

Спутниковые исследования выбросов грязевулканических флюидов и получение новых знаний о них представляются важными, в том числе для решения различных практических задач. Полученные в настоящей работе новые данные о ГВФ в морских акваториях могут использоваться для информационного обеспечения процессов поиска месторождений углеводородов, контроля экологической обстановки, для обеспечения безопасности судоходства, функционирования морских нефтегазовых промыслов и их инфраструктуры, а также при

принятии научно-обоснованных управленческих решений для предупреждения и снижения последствий чрезвычайных ситуаций в морских акваториях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алиев А.Д.* Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2006 (а). № 3. С. 35–51.
- Алиев А.И.* Грязевые вулканы – очаги периодической газогидродинамической разгрузки быстропогружающихся осадочных бассейнов и важные критерии прогноза газонасыщенности больших глубин // Геология нефти и газа. 2006 (б). № 5. С. 26–32.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. Москва: Научный мир, 2012. 558 с.
- Богоявленский В.И.* Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43. DOI: 10.7868/S020596141504003X.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651. DOI: 10.31857/S0002-3515551114-127.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здореннов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н.* 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., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006 (а). Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006 (б). № 6. С. 42–49.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей / под ред. Ф.С. Терзиев, А.Н. Косарев, А.А. Керимов. 1992. Том 6. Вып. 1. СПб: Гидрометеоиздат. 360 с.
- Дмитриевский А.Н. и др.* Механизм образования залежей углеводородов // Газовая промышленность. 1999. № 5. С. 74–77.
- Ерлов Н.Г.* Оптическая океанография. М.: Мир, 1970. 224 с.
- Ершов В.В.* Флюидодинамические процессы в зоне Центральносахалинского разлома (по результатам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане) // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 3. № 4. С. 345–360. DOI: 10.5800/GT-2012-3-4-0078.
- Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Лаврова О.Ю., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С.* Спутниковые наблюдения извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 332–336. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336.
- Матросова Е.Р., Ходаева В.Н., Иванов А.Ю.* Определение характеристик естественных нефтепроявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 2. С. 3–27. DOI: 10.31857/S0205961422020063.
- Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / под ред. В.Г. Бондур, И.И. Мохов, А.А. Макоско. Москва: Российская академия наук, 2022. 388 с.
- Соловьев В.Ф.* Грязевой вулкан “банка Ливанова” в Каспийском море. ДАН СССР, сер. геол., № 2, 1952.
- Холодов В.Н.* О происхождении грязевых вулканов // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2019. Т. 15. № 4 (58). С. 57–80. DOI: 10.15407/gpimo2019.04.057.
- Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: распространение и генезис // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.
- Черкашин В.И. и др.* Тектоническое строение и перспективы нефтегазоносности осадочного покрова дна Каспийского моря // Труды Института Геологии Дагестанского Научного Центра РАН. 2018. № 4 (75). С. 24–29.
- 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 (48). С. 5–25.
- Юсубов Н.П., Гулиев И.С.* Грязевой вулканизм и углеводородные системы Южно-Каспийской впадины (По новейшим данным геофизических и геохимических исследований). Баку: Элм, 2022. 168 с.
- Яцкая Н.А.* Восстановление полей температуры и солёности вод Каспийского моря с помощью гидродинамического моделирования // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017. № 1 (85). С. 122–128.
- Al-Lashi R.S., Gunn S.R., Czerski H.* Automated processing of oceanic bubble images for measuring bubble size distributions underneath breaking waves // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. V. 33. № 8. P. 1701–1714. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0222.1.
- Fallati L., Panieri G., Argentino C., Varzi A.G., Bünz S., and Savini A.* Characterizing Håkon Mosby Mud Volcano (Barents Sea) cold seep systems by combining ROV-based acoustic data and underwater photogrammetry. Front. Mar. Sci. 2023. 10:1269197. DOI: 10.3389/fmars.2023.1269197.
- Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I.* Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data, Journal of Marine Systems. V. 36. Iss. 3–4. 2002. P. 145–160. DOI: 10.1016/S0924-7963(02)00184-7.
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, SD, USA: USGS, 2019. Ed. 5. 114 p.
- Peli E.* Contrast in complex images // J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA. 1990. V. 7. № 10. P. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.

- Sentinel-2 User Handbook. European Space Agency (ESA) // ESA Standard Document. V.1. 2015. 64 p.
- Stramski D. Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas // Proc. SPIE 2258, Ocean Optics XII, (26 October 1994). V. 2258. P. 704–710. DOI: 10.1117/12.190117.
- Zhang X., Lewis M., Johnson B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean // Appl. Opt., AO. 1998. V. 37. № 27. P. 6525–6536. DOI: 10.1364/AO.37.006525.
- Vincent P. Sentinel-1 Product Specification. MPC-S1: ESA, 2020. 197 p.
- Wu T., Deng X., Yao H., Liu B., Ma J., Haider S.W., Yu Z., Wang L., Yu M., Lu J., Sohoo Engr.N., Kalhoro N.A., Kahkashan S., Wei J. Distribution and development of submarine mud volcanoes on the Makran Continental Margin, offshore Pakistan // Journal of Asian Earth Sciences. 2021. Vol. 207. P. 104653. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104653>

Monitoring of Mud-Volcanic Fluid Manifestations in the Caspian Sea According to Multispectral Satellite Data

V. G. Bondur¹, V. N. Chernikova¹, V. V. Zamshin¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

In this paper, 180 cases of mud-volcanic fluid (MVF) manifestations on the marine surface and in the near-surface layer of the Caspian Sea in the area of Cheleken-Livanovsk Rise in 2019–2021 were detected and studied based on the results of satellite monitoring using multispectral satellite data. For the areas of MVF manifestations, the reflectance was analyzed in 7 spectral bands of the Landsat-8 and Sentinel-2A/B equipment in the wavelength range of 0.44–2.2 μm . Significant positive contrasts in Violet ($\sim 0.44 \mu\text{m}$), Blue ($\sim 0.48 \mu\text{m}$), and Green ($\sim 0.56 \mu\text{m}$) spectral bands due to the presence of suspended matter and gas bubbles in the near-surface layer of the water column were detected in the areas of MVF manifestations. Mathematic expectations of Weber contrasts in those spectral bands varied in a range between $C \sim 0.47$ and $C \sim 0.77$. Complex analysis of spatio-geometric MVF manifestation characteristics and region bathymetry map allowed us to find coordinates of emission sources that corresponded to the peak of the mud-volcanic shoal.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, mud-volcanic fluids, multispectral satellite imagery, spectral reflectance

REFERENCES

- Aliev A.D. Griazevoi' vulkanizm Iuzhno-Kaspii'skogo neftegazonosnogo bassei'na // Geologiya i polezny'e iskopaemy'e mirovogo okeana. 2006 (a). № 3. Pp. 35–51.
- Aliev A.I. Griazevy'e vulkany' – ochagi periodicheskoi' gazogidrodinamicheskoi' razgruzki by'stropogruzhaiushchikhsia osadochny'kh bassei'nov i vazhny'e kriterii prognoza gazonosnosti bol'shikh glubin // Geologiya nefi i gaza. 2006 (b). № 5. Pp. 26–32.
- Ae'rokosmicheskii' monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa / pod red. V.G. Bondura. Moskva: Nauchny'i mir, 2012. 558 p.
- Bogoiavlenskii' V.I. Vy'brosy' gaza i nefi nasushe i akvatoriiakh Arktiki i Mirovogo okeana // Burenie i nef'. 2015. № 6. Pp. 4–10.
- Bondur V.G., Kuznetsova T.V. Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. Vol. 51. No. 9. Pp. 1060–1072. DOI: 10.1134/S0001433815090066.
- Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. Vol. 47. No. 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039.
- 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. Vol. 45. No. 5. P. 598–607. DOI: 10.1134/S0001433809050077.
- Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V., Dolotov Yu.S., Zdorovenov R.E., Petrov M.P., Tsidilina M.N. 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. Vol. 47. No. 6. P. 769–787. DOI: 10.1134/S0001437007060033.
- Bondur V.G., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V. Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // Oceanology. 2006 (a). Vol. 46. No. 6. P. 757–771. DOI: 10.1134/S0001437006060014.
- Bondur V.G., Keeler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I. Monitoring zagryazneniy pribrezhnykh akvatorii s ispolzovaniem mnogospektralnykh sputnikovykh izobrazheniy vysokogo prostranstvennogo razresheniya (Monitoring of the pollution of the ocean coastal water areas using space multispectral high resolution imagery) // Issledovanie Zemli is Kosmosa. 2006 (b). No. 6. P. 42–49.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei' / pod red. F.S. Terziev, A.N. Kosarev, A.A. Kerimov. 1992. Tom 6. Vy'p. 1. SPb: Gidrometeoizdat. 360 p.
- Dmitrievskii' A.N. i dr. Mehanizm obrazovaniia zalezhei' uglevodorodov // Gazovaia promy'shlennost'. 1999. № 5. Pp. 74–77.

- Erlov N.G.* Opticheskaja okeanografiya. M.: Mir, 1970. 224 p.
- Ershov V.V.* Fluidodinamicheskie protsessy v zone central'nosahalinskogo razloma (po rezul'tatam nabliudenii na Iuzhno-Sahalinskom griazevom vulkane) // *Geodinamika i tektonofizika*. 2015. T. 3. № 4. Pp. 345–360. DOI: 10.5800/GT-2012-3-4-0078.
- Ivanov A.Yu.* Slicks and Oil Films Signatures on Synthetic Aperture Radar Images. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 3. Pp. 73–96.
- Lavrova O.Iu., Uvarov I.A., Krashenninnikova Iu.S.* Satellite observations of the eruption of a mud volcano on the Dashly Island in the Caspian Sea on July 4, 2021 // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. 2021. T. 18. № 3. Pp. 332–336. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336.
- Matrosova E.R., Khodaeva V.N., Ivanov A.Yu.* Determining the Characteristics of Natural Oil Seeps and Their Underwater Sources Based on Remote Sensing Data // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2022. T. 58. № 9. Pp. 1008–1027. DOI: 10.1134/S0001433822090146.
- Methane and climate change: scientific problems and technological aspects. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2022 / Ed. by academician of the RAS V.G. Bondur, academician of the RAS I.I. Mokhov, and correspondent member of the RAS A.A. Makosko. 388 p.
- Solov'ev V.F.* Griazevoi vulkan "banka Livanova" v Kaspiskom more. DAN SSSR, ser. geol., № 2, 1952.
- Holodov V.N.* O proishozhdenii griazevykh vulkanov // *Geologiya i polezny'e iskopaemy'e mirovogo okeana*. 2019. T. 15. № 4 (58). Pp. 57–80. DOI: 10.15407/gpimo2019.04.057.
- Holodov V.N.* Griazevye vulkany: rasprostranenie i genezis // *Geologiya i polezny'e iskopaemy'e mirovogo okeana*. 2012. № 4. Pp. 5–27.
- Cherkashin V.I. i dr.* Tektonicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosti osadochnogo pokrova dna Kaspiskogo moria // *Trudy Instituta Geologii Dagestanskogo Nauchnogo Centra RAN*. 2018. № 4 (75). Pp. 24–29.
- Shniukov E.F., Aliev Ad.A., Rakhmanov R.R.* Griazevoi vulkanizm Sredizemnogo, Chernogo i Kaspiskogo Morei: Spetsifika razvitiia i proiavleniia // *Geologiya i polezny'e iskopaemy'e Mirovogo okeana*. 2017. № 2 (48). Pp. 5–25.
- Iusubov N.P., Guliev I.S.* Griazevoi vulkanizmi uglevodorodnye sistemy Iuzhno-Kaspiskoi vpadiny (Po novei'shim dannym geofizicheskikh i geohimicheskikh issledovaniy). Baku: E'lm, 2022. 168 p.
- Iaitkaia N.A.* Vosstanovlenie polei temperatury i solenosti vod Kaspiskogo moria s pomoshch'yu gidrodinamicheskogo modelirovaniia // *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2017. № 1 (85). Pp. 122–128.
- Al-Lashi R.S., Gunn S.R., Czerski H.* Automated processing of oceanic bubble images for measuring bubble size distributions underneath breaking waves // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2016. V. 33. № 8. P. 1701–1714. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0222.
- Fallati L., Panieri G., Argentino C., Varzi A.G., Bünz S., and Savini A.* Characterizing Håkon Mosby Mud Volcano (Barents Sea) cold seep systems by combining ROV-based acoustic data and underwater photogrammetry. *Front. Mar. Sci.* 2023. 10:1269197. DOI: 10.3389/fmars.2023.1269197.
- Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I.* Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data, *Journal of Marine Systems*. V. 36. Iss. 3–4. 2002. P. 145–160. DOI: 10.1016/S0924-7963(02)00184-7.
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Sioux Falls, SD, USA: USGS, 2019. Ed. 5. 114 p.
- Peli E.* Contrast in complex images // *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*. 1990. V. 7. № 10. P. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.
- Sentinel-2 User Handbook. European Space Agency (ESA) // ESA Standard Document. V.1. 2015. 64 p.
- Stramski D.* Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas // *Proc. SPIE 2258, Ocean Optics XII*, (26 October 1994). V. 2258. P. 704–710. DOI: 10.1117/12.190117.
- Zhang X., Lewis M., Johnson B.* Influence of bubbles on scattering of light in the ocean // *Appl. Opt., AO*. 1998. V. 37. № 27. P. 6525–6536. DOI: 10.1364/AO.37.006525.
- Vincent P.* Sentinel-1 Product Specification. MPC-S1: ESA, 2020. 197 p.
- Wu T., Deng X., Yao H., Liu B., Ma J., Haider S.W., Yu Z., Wang L., Yu M., Lu J., Sohoo Engr.N., Kalthor N.A., Kalkashan S., Wei J.* Distribution and development of submarine mud volcanoes on the Makran Continental Margin, offshore Pakistan // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2021. Vol. 207. P. 104653. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104653>