

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 525—555.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 525—555.

Научная статья

УДК 528.8:553.9(26)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555

Обзор методов дистанционного обнаружения морских залежей углеводородов

***Виктория Владимировна Позднякова,
Марина Александровна Кустикова***

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская
Федерация, viktoriia.17@mail.ru

Аннотация. Мировой океан содержит огромное количество минеральных ресурсов, среди которых большую долю занимают углеводороды. По мере развития методов и технологий обнаружения морских залежей возможности и научная база расширяются. Особое внимание уделяется дистанционным методам исследования океана, что обусловлено их наибольшей информативностью и возможностью оперативного получения данных. В данной работе выполнен анализ источников, представляющих интерес для исследователей, занимающихся разработкой методов и средств обнаружения морских залежей углеводородов с использованием информации о видах и индикаторах, их возможных проявлениях на поверхности воды, а также о существующих методах их дистанционного обнаружения. Обзор научной литературы позволяет наметить основные задачи и перспективы исследований в области обнаружения морских залежей.

Ключевые слова: морские залежи углеводородов, методы дистанционного обнаружения углеводородов, геологоразведка, оценка нефтегазоносности акватории, индикаторы морских залежей, углеводороды, Мировой океан.

Для цитирования: Позднякова В. В., Кустикова М. А. Обзор методов дистанционного обнаружения морских залежей углеводородов // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 525—555. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555.

Original article

The offshore hydrocarbon deposits remote detection methods review

Viktoriia V. Pozdniakova, Marina A. Kustikova

ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

Summary. The World Ocean contains a huge amount of mineral resources at its bottom, among which hydrocarbons occupy a large share. The suitable method for identifying indicators of offshore hydrocarbon deposits choice is an important step towards qualitative and quantitative analysis results. With the detecting marine deposits technologies development special attention are paid to Remote Ocean studying methods. This article gives an overview aimed at presenting the available information on the types and indicators

of marine hydrocarbon deposits, their possible manifestations on the water surface, as well as on existing methods of their remote detection.

In the presented work, the main hydrocarbon gases, their background concentrations and manifestations in the water areas were analyzed and described. It was found out that the following factors are indicators of deposits: the presence of gas bubbles on the water surface and the water column; development of phytoplankton vital activity; water temperature change; the presence of mud volcanoes.

This article discusses such remote methods of offshore hydrocarbon deposits detecting as gravimetric method, magnetometric, seismic, geoelectrochemical and acoustic methods. Furthermore, the analysis of satellite methods is also presented by aerospace photography and thermal imaging, as well as the analysis of optical methods - the method of absorption spectroscopy, the method of fluorescence, laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Raman spectroscopy. The comparative analysis of the methods characteristics as well as technical features are given, among which the most and least studied are identified.

The review allows to outline the main tasks and prospects of research in the field of marine exploration.

Keywords: marine hydrocarbon deposits, offshore hydrocarbon deposits, remote hydrocarbons detection methods, geological exploration, assessment of oil and gas potential of the water area, marine deposits indicators, hydrocarbons, the World Ocean.

For citation: Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. The offshore hydrocarbon deposits remote detection methods review. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 525—555 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-525-555.

Введение

Мировой океан содержит огромное количество ресурсов, включая углеводороды, полезные ископаемые, гидротермальные источники и биологические ресурсы [1, 2]. По данным [3], континентальный шельф содержит около 35 % мировых запасов нефти и 29 % запасов природного газа (рис. 1); разработанные морские месторождения обеспечивают 30 % общемировой добычи нефти и газа.

Первая «морская» скважина была пробурена в Каспийском море в 1949 г. [4], однако активные геологоразведочные работы морских месторождений начались примерно в 60-х годах прошлого столетия [5—6].

Ресурсы Мирового океана, млрд т нефтяного эквивалента



Рис. 1. Углеводородный потенциал морских месторождений [2].

Fig. 1. Hydrocarbon potential of offshore fields.

Для понимания тенденций совершенствования методов обнаружения морских углеводородов был проведен библиометрический анализ на основе одной из самых крупных библиографических и реферативных баз данных рецензируемой научной литературы Scopus, согласно которой первые научные публикации, посвященные методам обнаружения морских залежей углеводородов, появились только в 1981 г. Значительный рост публикационной активности начался с 2008 г. По результатам анализа данных, приведённых на рис. 2, можно сделать вывод об эволюции направлений исследований в области шельфовой геологоразведки. Так, до 2014 г. основные исследования были посвящены строению нефтяных пластов инвазивными методами каротажа и нефтяного машиностроения. С 2015 г. по настоящее время к актуальным вопросам относятся методы дистанционного обнаружения углеводородов, основанные на изучении разных физических и химических явлений, происходящих в толще воды.

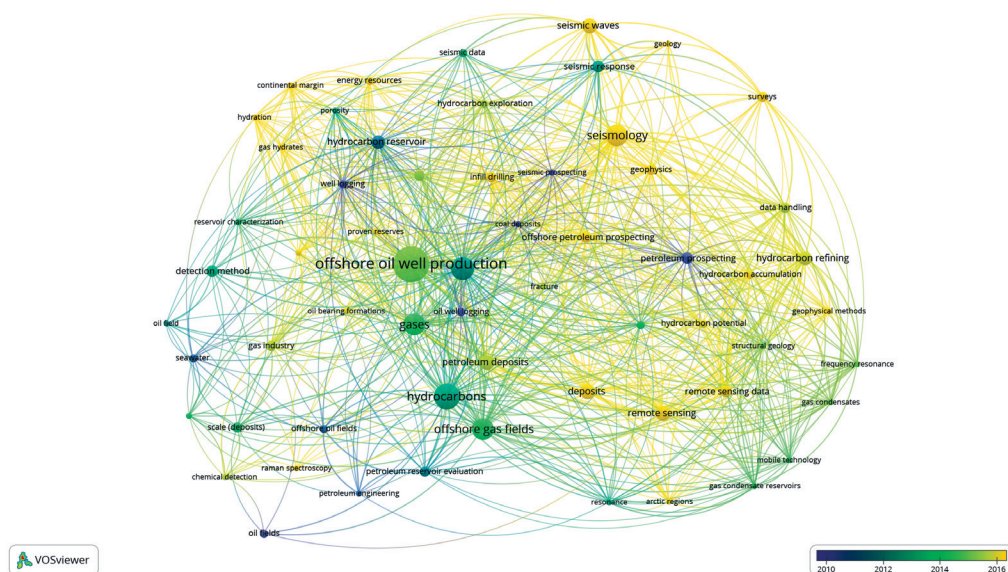


Рис. 2. Библиометрическая карта использования ключевых слов по теме «Методы обнаружения морских залежей углеводородов» (по данным базы Scopus на конец декабря 2022 г.), отображающая наиболее часто встречающиеся в статьях в различный период времени ключевые слова, которые имеют цветовой градиент от фиолетового (основное количество публикаций выпускалось в 2010 г. и ранее) до желтого (публикации с 2016 г.) в зависимости от даты публикации.

Fig. 2. Bibliometric map of the keywords use on the topic “Methods for detecting offshore hydrocarbon deposits” (based on Scopus data from the end of December 2022) displaying the most frequently used keywords in articles in different periods of time, which have a color gradient from purple (the main number of publications were issued in 2010 and earlier) to yellow (published since 2016) depending on the publication date.

Помимо этого, основываясь на данных библиометрического анализа, следует отметить тенденцию разделения научных исследований на кластеры. Так, например, отдельно выделяется направление «сейсмология», что объясняет обширную применимость, значимость и изученность данного метода. Однако несмотря на «популярность» вопросов сейсмологии, можно сделать вывод о том, что многие темы представленного направления были обширно исследованы лишь в период с 2012 г. по 2014 г. В свою очередь, кластер «Дистанционные методы детектирования» становится все более привлекательным в настоящее время. Помимо кластеров «Сейсмология» и «Дистанционные методы детектирования» ярко выражены исследования о «Расчете потенциала нефтегазоносности», а также «Геологическом описании резервуаров».

Данная работа посвящена обзору существующих методов дистанционного детектирования различных видов морских залежей углеводородов, а также индикаторных веществ и их проявлений на дне, поверхности или в толще воды. Приведен сравнительный анализ характеристик методов, среди которых выявлены наиболее и наименее изученные. Обзор позволяет наметить основные методологические задачи и перспективы исследований в данной области.

Виды морских углеводородов

Углеводород представляет собой органическое вещество, состоящее из углерода и водорода [7]. В природе углеводороды как в газообразной (метан C_1 , этан C_2 , пропан C_3 , бутан C_4), так и в жидкой фазах (бензол, гексан, октан, газовый конденсат C_5+), в основном содержатся в пористых горных породах, составляющих верхнюю континентальную кору Земли, являются продуктом химических и физических процессов, и могут сохраняться в течение тысяч или миллионов лет [8]. Углеводороды с более низкой молекулярной массой находятся в газообразном состоянии, в то время как углеводороды с более высокой молекулярной массой представляют собой жидкие или воскообразные твердые вещества [9].

Считается, что морская среда идеальна для образования углеводородов, поскольку фитопланктон, зоопланктон, наземные и морские растения оседают в большом количестве на морском дне, и содержащееся в них органическое вещество быстро подвергается анаэробному разложению из-за незначительного содержания кислорода на глубине [10]. Кроме того, высокие и быстрые скорости осаждения, типичные для определенных морских сред, способствуют быстрому захоронению и разложению органического вещества из-за изменения температуры в зависимости от глубины залегания.

Наиболее распространенным углеводородом является метан, который считается относительно чистым ископаемым топливом, однако он также является важным парниковым газом, мониторинг которого необходимо проводить постоянно, чтобы избежать массовых утечек. Глубоководные морские отложения являются крупнейшим резервуаром метана, в основном в их гидратной форме [11].

В статье [12] описаны результаты исследований, включающие определение нефтегазового потенциала, проводившихся вдоль склона юго-западного суббассейна

Южно-Китайского моря. На основе 39 образцов сделан вывод, что из представленных проб метан является доминирующим газом. Его концентрация изменялась от 0,5 до 440 ppm, при этом фоновой считается концентрация в 40 ppm. Помимо этого, аномальные концентрации метана наблюдались на обширных территориях. В исследованиях [13—14] также отмечаются высокие концентрации метана, что говорит о газоносном потенциале акватории [15]. Помимо метана были также отмечены превышения фоновых концентраций таких газов, как этан, этилен и пропан, концентрация этилена составляла 0,06—70 ppm, а этана — 0,01—124 ppm. В [16—18] представлена похожая ситуация, когда измеренные концентрации углеводородных газов значительно превышали фоновые.

Отдельное внимание следует уделить значениям фоновых концентраций углеводородов, которые имеют отличающиеся значения для разных регионов [19]. Это требуется для выявления аномалий концентрации, которые могут быть результатом миграции. Фоновые концентрации метана для некоторых акваторий океана приведены в табл. 1. Для удобства сравнения приведённые в таблице концентрации были переведены в общую единицу измерения — ppm.

Таблица 1

Фоновые концентрации метана на различных акваториях
Methane background concentrations in various water areas

№	Акватория	Фоновая концентрация	Источник
1	Северное море	0,025—0,05 ppm	[19]
2	Южно-Китайское море	40 ppm	[12]
3	Баренцево море	0,178 ppm	[19]
4	Норвежское море	1,91—1,95 ppm	[17]
5	Берингово море	30—80 ppm	[18]
6	Гданьский залив	14 ppm	[20]

Процессы просачивания углеводородов

Углеводороды менее плотны, чем окружающие породы и отложения, поэтому они имеют тенденцию мигрировать в более мелкие осадочные горизонты и, в конечном итоге, «прокалывать» морское дно, приводя к возникновению своеобразных особенностей морского дна, таких как покмарки [21—22], газовые сипы [23] и грязевые вулканы [24].

Впервые просачивание углеводородных газов было описано в [25], а затем подтверждено многими научными исследованиями, в том числе российскими [26—33].

Просачивание углеводородов варьируется от больших концентраций — макросипов — до очень сложно детектируемых — микросипов [34, 35]. Поверхностное просачивание углеводородов разделяют на активное и пассивное [35]. Активными называются области просачивания, где фиксируются высокие концентрации углеводородов над самими залежами, они также подразделяются на постоянные и разовые [36]. Постоянные газовые проявления способны обеспечивать

жизнь хемоавтотрофным организмам, к которым относятся метанотрофные митилиды (мидии) и моллюски *Vesicomyid*, что, в свою очередь, может являться индикатором местонахождения морских залежей. Разовыми газовыми проявлениями называют экстренный выброс большого количества газа в приповерхностный слой, например, в виде грязевых вулканов или газовых факелов [37]. Пассивные же характеризуют акватории, где фиксируются предповерхностные просачивания в очень маленьких концентрациях (меньше 50 ppm) и обнаруживаются газовые гидраты в донных отложениях.

Активные выбросы происходят за счет быстрого осадконакопления и движения тектонических плит, что приводит к активному образованию залежей под избыточным давлением и диапиризму за счет ила и соли. Такие проявления характерны для южных районов Каспийского моря [38], Мексиканского залива [39] и др. Пассивная микрофильтрация в основном встречается в северных регионах: Норвежское море [40], Чукотское море [41], Северное море и происходит в бассейнах с медленным осадконакоплением и «тектоническим покоем» [34].

Одной из важных задач в фиксировании просачиваний углеводородов является интерпретация поверхностных геохимических данных, для чего необходимо понимание вертикального и горизонтального распределения аномальных углеводородов. Горизонтальное распределение формируется за счет аномальных концентраций углеводородов, значительно превышающих фоновые, которые образуются над нефтегазовыми месторождениями, образуя ореолы рассеяния [34]. В статье [34] приводится обзор исследований [40, 42—47], в которых описаны узорчатые ореолы микросипов над различными морскими месторождениями. Большинство примеров показывает, что наибольшие концентрации углеводородов наблюдаются вблизи самих разломов и в донных осадках, но никаких геофизических или геохимических аномалий в толще воды или на поверхности океана обнаружено не было.

Однако выполненные исследования вертикального распределения углеводородов [48—52] демонстрируют значительные различия в их концентрациях и типах. Вертикальные профили показали наличие углеводородов и их увеличение с глубиной. Например, в исследовании [53] при проведении анализа вертикального распределения выявлено, что общая концентрация газа увеличилась более чем в 100 раз при увеличении глубины от 1 до 10 м (рис. 3). Кривая вертикального распределения концентраций весьма важна и для других акваторий [26, 55—56].

Российские исследования [26—32] зафиксировали выход метана в атмосферу. Метан выбрасывается в атмосферу двумя процессами: диффузионным переносом газа и кипением (барботажем) через границу раздела «вода–атмосфера» [29]. Особенно активные выбросы метана из донных источников наблюдались в мае–июне, так как в это время происходит перемешивание газа по всей толще воды в результате конвекции [37].

После выброса метана в водную толщу может происходить либо окислительный процесс, где метан растворяется в воде, либо пузырьки газа достигают водной поверхности, где возможен один из двух вариантов: переход в атмосферу в летний период, так как метан не успевает окислиться, или столкновение с ледовой

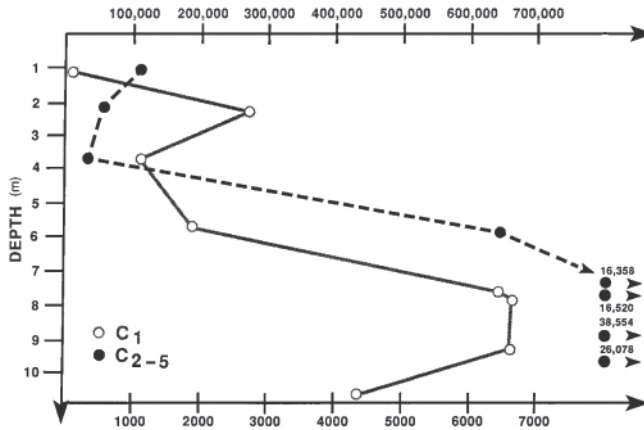


Рис. 3. Зависимость концентраций углеводородов от глубины шельфа Мексиканского залива [53], где C_1 и C_{2-5} — виды углеводородов.

Fig. 3. Dependence of hydrocarbon concentrations on the depth in the shelf of the Gulf of Mexico [53], where C_1 and C_{2-5} are the hydrocarbons types.

поверхностью в зимний период [57]. При этом окисление метана сопровождается значительным выделением тепла [58], поэтому в зимний период на нижней границе льда могут фиксироваться трещины и каналы. Помимо этого скорость подъема пузырьков может также быть индикатором вертикальных течений [59].

Анализ углеводородных газов, которые мигрировали на поверхность, и сопутствующих факторов позволяет получить полезную информацию о подповерхностных углеводородных системах, особенно в плохо изученных «пограничных» районах, где нет доказательств наличия нефтяных систем путем глубокого бурения. Информация о просачивании углеводородов имеет огромное значение при планировании геологоразведочных исследований для понимания геологии морского бассейна и динамики образования нефтегазовых залежей, а также при правильной интерпретации поверхностных геохимических данных. Данные исследования также представляют особую ценность для климатического мониторинга.

Дистанционные методы детектирования

Просачивание углеводородов на поверхность акватории является индикатором потенциальной нефтегазоносности территории, однако в то же время из-за изменения плотности воды является опасным фактором для проведения полевых судовых работ по оценке предполагаемых месторождений [60]. Помимо этого прямой отбор проб газа в водной среде не так прост, как на суше из-за высокого гидростатического давления и необходимости поддерживать давление отбираемых жидкостей на уровне их собственного [61]. В связи с этим методы дистанционного зондирования являются наиболее оптимальными и актуальными.

Геологоразведка начинается с изучения морской толщи воды и морского дна. Для этих целей сначала используют неинвазивные методы, а затем, после определения примерного объема и местонахождения залежей, используется метод пробной скважины [62].

Неинвазивные методы обнаружения углеводородов можно разделить на те, которые применяются с исследовательских судов, авиационные или спутниковые методы, транспортные подводные аппараты (ТПА), а также гибриды перечисленных методов [63].

К методам обнаружения углеводородов с судов относятся: гравиметрический метод, магнитометрический, сейсмический, геоэлектрохимический и акустический.

Гравиметрический метод основан на измерении изменений в гравитационном поле Земли. Данный метод может быть использован для обнаружения подводных холмов и вулканических образований, которые могут указывать на наличие месторождений. Гравиметрические работы обычно включают в себя опорные (причалные), рядовые и контрольные морские измерения [64]. Опорные (причалные) измерения проводятся на борту судна до его отправки в полевые исследования в течение нескольких суток, рядовые измерения проводятся при самих геофизических работах и контрольные — по секущим профилям.

Помимо непосредственных измерений с судна существуют также аэрогравиметрические системы, позволяющие провести анализ территории с воздушных носителей [65]. При сравнении наземной и воздушной гравиметрии китайскими исследователями [66] было отмечено, что в целом разломы крупного и среднего размера, полученные с воздушных носителей, совпадают с наземными измерениями, но есть различия в расположении мелкомасштабных разломов.

Современные программные пакеты, разработанные российскими учеными для обработки гравиметрических данных [67—68], совместно с данными систем спутникового позиционирования позволяют снизить погрешность приливных поправок.

Однако данный метод не всегда является точным из-за возможного наличия других объектов, которые могут влиять на гравитационное поле. При проведении измерений в Арктическом регионе возникают трудности из-за ограничения в маневрировании, которые связаны с постоянным перемещением ледового покрова с разной толщиной и сплоченностью [69].

Магнитометрический метод основан на измерении изменений в магнитном поле Земли, обусловленных магнитными свойствами подстилающих пород [70], и используется для обнаружения подводных магматических пород и других объектов, которые могут указывать на наличие месторождений.

Измерения проходят следующим образом: два магнитометра опускаются за борт судна на разном расстоянии, в результате чего получается градиент магнитных аномалий, который в дальнейшем дает возможность картировать зоны разломов и более детально исследовать геолого-структурное строение исследуемой территории [64]. Данная процедура также может применяться при неэффективности гидроакустических средств, например, на мелководьях [71], но при условии разработки усовершенствованной модели магнитного градиента, описанной в [72].

К очевидным достоинствам магниторазведки относится ее низкая стоимость по сравнению с другими методами [73]. Магнитные съемки в шельфовых морях направлены не только на изучение структуры дна, но и на прогнозирование экологических опасностей [72].

Основная проблема как гравиметрического, так и магнитометрического метода состоит в том, что зачастую источники могут создавать один и тот же гравитационный и/или магнитный резонанс [74], а в высокоширотных районах точность геомагнитной съемки существенно снижается из-за искажающего влияния геомагнитных вариаций [72, 75].

Сейсмическая разведка — метод, при котором на дно акватории опускается специальное оборудование, состоящее из искрового излучателя (спаркера) и приемного устройства (косы), генерирующее звуковые волны, которые отражаются от различных слоев грунта и возвращаются на поверхность, где они регистрируются и анализируются.

Разделяют традиционную сейсмическую обработку (частота от 5 до 120 Гц) для разведки морских месторождений нефти и газа на глубинах в несколько километров [76] и инженерную (частоты до нескольких килогерц в секунду) для характеристики отложений в верхних слоях на несколько сотен метров ниже уровня морского дна [77]. Существуют примеры успешного применения технологии с двумя датчиками для изучения верхних подповерхностных отложений [78]. Этот метод является наиболее распространенным и эффективным [79], но дорогостоящим и требующим большого количества времени.

В [80] предложен новый геоэлектрохимический метод разведки морских месторождений нефти и газа во время движения судна без взятия донных проб. Принцип действия состоит в следующем: подвесная часть морской разведывательной системы буксируется за судном, проникая в среднюю часть водной толщи, фиксируя ионную активность преимущественно тяжелых металлов. Он может использоваться также для определения метана [80]. В тоже время можно измерить напряженность естественного электрического поля слоя воды. Данный метод был апробирован на нефтегазоносной территории Карского моря, что позволяет сделать вывод о возможности работы аппаратуры в условиях Крайнего Севера.

Акустические исследования заключаются в распознавании зон газовых факелов посредством излучения сложного сигнала с частотной или фазовой модуляцией и дальнейшем его приеме от водной толщи в удаленной точке приемником колебательной скорости. По данным акустической съемки, представляется возможным оценить количество и объем газовых пузырьков на разных глубинах, а также рассчитать их направление движения, что позволяет понять траекторию от дна к поверхности и оценить скорость всплытия [81].

Акустические методы можно разделить на три группы в зависимости от диапазона частот: 5—200 Гц; 200 Гц — несколько кГц; несколько кГц — больше 100 кГц [82].

Акустический метод обладает высокой точностью при обнаружении газа в морской воде, т.к. газ обладает отличительными акустическими свойствами по сравнению с окружающей водой и осадочными породами. Основная проблема

для реализации исследований по акустическому зондированию заключается в необходимости проводить длительные по времени измерения с высоким пространственным и временным разрешением [83].

Несмотря на эффективность судовых исследований, с целью снижения стоимости и времени поисковых работ их целесообразно проводить, основываясь на уже имеющихся данных о потенциальной нефтегазоносности территории, которые могут быть получены с помощью методов, реализованных на спутниках, воздушных носителях или транспортных подводных аппаратах (ТПА).

Прежде чем перейти к обзору данных методов, следует обратить особое внимание на физическую основу спутниковых систем мониторинга, так как наибольшими трудностями при измерениях является влияние атмосферы [84—86]. Различные сенсоры, установленные на спутниковых системах, позволяют детектировать видимую, ИК и СВЧ области электромагнитного спектра, которые могут использоваться для мониторинга поверхности воды [86]. Краткая информация об основных спутниках, используемых для задач морского мониторинга, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Краткие сведения о распространенных спутниковых системах
Brief information about common satellite systems

№	Спутниковая система	Страна	Тип данных	Год запуска	Источник с актуальными исследованиями
1	LANDSAT	США	оптические	несколько запусков с 1972	[87]
2	Aqua	США	оптические	2002	[88]
3	Ресурс	РФ	оптические	2006	[89]
4	Radarsat-2	Канада	радарные	2007	[90]
5	TerraSar-X/ TanDEM-X	Германия	радарные	2007	[91]
6	Канопус-В	РФ	оптические	2012	[92]

К методам анализа с помощью спутников, воздушных носителей и ТПА относятся: оптическая, аэрокосмическая и тепловизионная съемка.

Аэрокосмическое изучение месторождений основано на исследовании характеристик земной поверхности, прогнозируемых ландшафтных аномалий и геоморфологических особенностей территории. Их дальнейший анализ включает в себя структурное дешифрирование космических снимков, в результате чего выделяются региональные разломы, зоны неотектонических поднятий, строение фундамента и т.д. [93]. По результатам аэрокосмической съемки строят геологические, тектонические, инженерно-геологические карты, а на выявленных локальных ландшафтных аномалиях рекомендуется проведение сейсморазведочных работ [94].

К явным плюсам аэрокосмического метода можно отнести следующие: большое пространственное разрешение, возможность работы в любых труднодоступных районах, возможность многократно наблюдать исследуемые районы и

работать при частичном или полном отсутствии топографической основы, а также относительную дешевизну информации [94].

Метод тепловизионной съемки основан на обработке снимков теплового излучения поверхности Земли, а также морской поверхности и толщи океана. Таким образом получают и обрабатывают спектрозональные снимки в диапазонах видимого спектра и в инфракрасном диапазоне длин волн 8—14 мкм [95].

В процессе дешифрирования снимков теплового поля выявляются разрезы геотермических аномалий, термодинамические неоднородности, зоны сжатия, разуплотнения пород. Современные приборы помимо качественного анализа дают возможность провести и количественный анализ [96]. Все эти данные позволяют построить объемную модель формирования глубинных структур и блоково-разломных структур, составить карты горизонтальных и вертикальных разрезов [95—96]. С помощью построенных моделей и интерпретации других геодинамических данных определяют механизмы тепловых потоков [97—98], в частности, возможность накопления глубинных флюидов, включая углеводороды.

Ученым Р.Д. Мухамедяровым был разработан усовершенствованный метод МВТГМ (метод видеотепловизионной генерализации Мухамедярова), основанный на тепловизионном анализе данных космо- и аэросъемок в ИК тепловом диапазоне [99]. Суть метода основана на таком явлении, как «память» теплового излучения о своем происхождении, ибо глубинная структура Земли полупрозрачна в оптическом диапазоне длин волн [100].

Другими, хорошо зарекомендовавшими себя как для обнаружения макросипов [101], так и микросипов [102—103] методами, являются *оптические* методы. Основу лазерных спектрально-оптических комплексов для подводных исследований составляет спектрометр, который в зависимости от вида применяемого источника излучения может работать по одной из измерительных схем: абсорбционной, флуоресцентной или рамановской.

Метод абсорбционной спектроскопии основан на излучении лазерного луча и его отражении обратно в детектор. Вдоль пути лазерного луча присутствие целевого газа изменяет спектр лазера за счет поглощения света в определенном диапазоне длин волн, который обнаруживается прибором по возвращении лазерного луча.

В настоящее время существуют методики, которые позволяют выделить целевой газ из жидкой фазы при помощи специальных мембран или распыляющих систем, которые также основаны на методе абсорбции [104]. Однако в связи с тем, что метод абсорбционной спектроскопии требует выделения газовой фазы из жидкостной, такая методика перестает быть дистанционной. К реализованным в настоящее время приборам можно отнести компактные датчики метана METS и HydroC/CH₄ [105], которые помещаются в подводные аппараты геологоразведки, и могут снимать данные до нескольких километров в глубину.

К недостаткам представленных систем относится резкое снижение скорости диффузии газов при низких температурах морской воды, что ведет к существенному увеличению времени измерений и делает невозможным проведение глубинного профилирования, то есть составления карты вертикального распределения

газов [105], поэтому его использование в северных районах не является целесообразным.

Спектроскопия флуоресценции основана на принципе регистрации обратного упругого рассеяния при использовании гидролидарных систем. Основной составляющей спектра является широкая полоса флуоресценции растворенного органического вещества [106—108]. Данный метод неоднократно использовался при обнаружении углеводородных газов в воде, а также нефтяных пленок в режиме реального времени [109, 110]. Однако основным его недостатком является то, что флуоресцентные аппараты не предоставляют информацию о степени диспергирования нефти и количественном анализе газов [111, 112].

В работе [113] авторами предложен аппаратный комплекс, основанный на методе *лазерной искровой спектроскопии (LIBS)*, принцип которого заключается в генерации лазерной плазмы как источника возбуждения атомных и молекулярных эмиссионных спектров [113, 114].

Несмотря на то, что данный метод активно используется для газовых сред, сложности, связанные с высокой теплопроводностью воды [115, 116], делают его менее привлекательным для исследователей морской среды. Это связано с тем, что плазма, генерируемая в воде, подвергается сильному эффекту гашения и удержания, что значительно ухудшает качество сигнала [115]. Имеющиеся разработки могут быть использованы только на подводных аппаратах носителей рабочего класса. Основываясь на работах [113, 117—119], можно сделать вывод, что у данного метода есть ряд преимуществ, главным из которых является тот факт, что при определенных обстоятельствах он позволяет дистанционно обнаружить любое вещество и исследовать различные аспекты глубоководной среды [114, 118].

Не так давно для задач морского мониторинга начал широко применяться *метод комбинационного рассеяния* [120, 121], в частности для распознавания газовых включений в морской воде [122—125]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при обнаружении газовых гидратов [126—128], углеводородных газов в морской воде [129] и даже их изотопов в воздухе [130—134], поэтому был апробирован в ряде исследований. Эффект комбинационного рассеяния света характеризуется сдвигом длины волны излучения, рассеянного молекулярными связями [135]. Метод детектирования позволяет измерять несколько компонентов одновременно и не требует никаких реагентов или расходных материалов, что делает его наиболее оптимальным при измерениях *in situ*.

В последние годы всё большую популярность в мониторинге состояния морской среды набирают оптоволоконные датчики [136—137], основанные на разных оптических явлениях (табл. 3). На сегодняшний день с их помощью можно измерять физические свойства водной толщи (глубина, температура [138], давление [127] и др.), а также некоторые химические показатели (рН и соленость воды) [139]. В целях обнаружения утечек жидких углеводородов исследователями предложены определенные виды датчиков [140—143], однако данное направление требует дальнейшего развития.

Сравнение характеристик методов дистанционного обнаружения залежей углеводородов представлено в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 3

Виды оптоволоконных датчиков

Types of fiber optic sensors

Оптоволоконные датчики (сенсоры)		
Точечный датчик	Квазираспределенный датчик	Распределенный датчик
интерферометрический датчик	WDM-FBG датчик	комбинационное рассеяние света
FBG датчик		рэлееское рассеяние света бриллюэновское рассеяние света

Таблица 4

Сравнение характеристик дистанционных методов обнаружения морских залежей углеводородов

Remote methods characteristics for offshore hydrocarbon deposits detecting comparison

№	Метод	Погрешность измерений	Установка измерительного комплекса	Источник
1	Гравиметрический	1—1,5 мГал	Судно, воздушные средства мониторинга	[64, 67, 69]
2	Магнитометрический	10^{-3} — 10^{-4} А/м	Судно	[64, 72]
3	Сейсмический	$\pm 15 \%$	Судно	[144]
4	Геоэлектрохимический	0,02 мВ	Судно	[80]
5	Акустический	$0,33 \pm 0,07$ $\text{ммоль} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$	Судно	[81]
6	Аэрокосмическая съемка	0,9 Вт/(см ² мкм)	Воздушные средства мониторинга, спутник	[93—94]
7	Тепловизионная съемка	2,5—2,72	Воздушные средства мониторинга, спутник	[99—100, 145]
8	Метод абсорбционной спектроскопии	-	ТПА	[110, 146]
9	Метод флуоресценции	$\pm 17,27 \text{ ppb}$	Воздушные средства мониторинга, спутник	[119]
10	Метод лазерной искровой спектроскопии	$\pm 5 \%$	ТПА	[113, 147]
11	Метод комбинационного рассеяния	$\pm 5\%$	Воздушные средства мониторинга, спутник, ТПА Оптические датчики	[119, 130]

Таблица 5

Преимущества и недостатки дистанционных методов обнаружения углеводородов

The remote hydrocarbon detection methods advantages and disadvantages

Метод	Преимущества	Недостатки
Гравиметрический	Простота измерений Дешевизна получения экспериментальных данных	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Возможность влияния других объектов на полученные данные

Метод	Преимущества	Недостатки
Магнитометрический	Простота измерений Дешевизна получения экспериментальных данных Возможность прогнозирования экологических опасностей	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Возможность влияния других объектов на полученные данные
Сейсмический	Позволяет построить детальную картину морского дна Высокая эффективность	Сложность интерпретации полученных данных Длительность измерений Дороговизна получения экспериментальных данных
Геоэлектрохимический	Возможность дополнительных измерений тяжелых металлов	Возможность измерений только одного индикаторного вещества — метана
Акустический	Высокое пространственное разрешение Высокая точность Позволяет оценить количество и объем газовых пузырьков на разных глубинах	Сложность интерпретации полученных данных Длительность измерений Дороговизна получения экспериментальных данных
Аэрокосмическая съемка	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Выявление локальных аномалий Возможность реализации различного вида картирования Возможность многократного наблюдения исследуемых районов	Обнаружение только косвенных признаков месторождений Недостаточно эффективный как самостоятельный метод Влияние атмосферы
Тепловизионная съемка	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Выявление локальных аномалий Возможность многократного наблюдения исследуемых районов	Сложность интерпретации полученных данных Влияние атмосферы Обнаружение только косвенных признаков месторождений Недостаточно эффективный как самостоятельный метод
Метод абсорбционной спектроскопии	Высокое пространственное разрешение Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Невозможность проведения глубинного профилирования Сложный пробоотбор и пробоподготовка в морской среде Длительность измерений
Метод флуоресценции	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Невозможность проведения глубинного профилирования Влияние атмосферы
Метод лазерной искровой спектроскопии	Возможность детектирования всех индикаторных веществ	Сложный пробоотбор и пробоподготовка в морской среде

Метод	Преимущества	Недостатки
Метод комбинационно-го рассеяния	Высокое пространственное разрешение Возможность работы в любых труднодоступных районах Возможность детектирования всех индикаторных веществ Высокая селективность компонентов	Дороговизна получения экспериментальных данных Влияние атмосферы

Заключение

В представленной работе были проанализированы и описаны методы дистанционного детектирования морских залежей углеводородов, их видов, а также возможности их обнаружения. Было показано, что индикаторами залежей углеводородов являются следующие факторы:

- 1) наличие газовых пузырьков на водной поверхности и водной толще;
- 2) развитие жизнедеятельности фитопланктона;
- 3) изменение температуры воды;
- 4) наличие грязевых вулканов и покмарков.

Приведены и подробно описаны существующие методы дистанционного изучения морской геологоразведки.

Следует отметить, что выбор подходящего метода идентификации индикаторов морских залежей углеводородов является важным этапом на пути к их качественному и количественному анализу. Кроме того, разумное сочетание нескольких методов для определения комплекса индикаторов также может помочь в получении полной картины для последующего геологического моделирования месторождений.

Список литературы

1. Zhai M., Hu. R., Wang Y. et al. Mineral resource science in China: Review and perspective // *Geography and Sustainability*. 2021. V. 2. P. 107—114. doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002.
2. Пономарев А. С., Поздняков А. С. Современные тренды развития мирового сектора морской добычи углеводородов // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2018. № 11. С. 40—50.
3. Makarov A. A., Grigoriev L. M., Mitrova T. A. World and Russian Energy Outlook up to 2040, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013, 110 p.
4. Васильцова В. М. Проблемы освоения шельфовых месторождений нефти и газа // *Записки Горного института*. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-osvoeniya-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti-i-gaza> (дата обращения: 04.04.2023).
5. Wolfe K. J., Parker G. J., Sellars S. L. Hebron Offshore Development Project Overview // *Offshore Technology Conference*. 2018. P.1—12. doi:10.4043/28695-ms.
6. Kaiser M. J. A Review of Exploration, Development, and Production Cost Offshore Newfoundland // *Natural Resources Research*. 2021. V. 30(2). P. 1253—1290 doi.org/10.1007/s11053-020-09784-3.
7. Jahn F., Cook M., Graham M. Hydrocarbon Exploration and Production. Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2008. 456 p.
8. Picard K., Radke L. C., Williams D. K. et al. Origin of high density seabed pockmark fields and their use in inferring bottom currents // *Geosciences*. 2018. No. 8 (6): 195. doi.org/10.3390/geosciences8060195.

9. Земцова М. Н., Бормашева К. М., Моисеев И. К. Углеводороды: учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2016. 147 с.
10. Rovere M., Mercorella A., Frapiccini E. et al. Geochemical and Geophysical Monitoring of Hydrocarbon Seepage in the Adriatic Sea // *Sensors*. 2020. No. 20(5). 1504. doi.org/10.3390/s20051504.
11. Kvenvolden K. A. Methane hydrate—A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. P. 41—51. doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0.
12. Ле Д. Л., Обжиров А.И., Нгуен Х. и др. Распределение газов в донных отложениях юго-западного суббассейна Южно-Китайского моря // *Тихоокеанская геология*. 2021. Том 40. № 2. С. 67—77. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-2-67-77.
13. Shakirov R. B., Lan N. H., Yatsuk A. et al. Methane flux into the atmosphere in the Bien Dong (East Sea of Vietnam) // *Journal of Marine Science and Technology*. 2018. V. 18. No. 3. P. 250—255. DOI: 10.15625/1859-3097/18/3/12696.
14. Shakirov R. B., Yatsuk A. V., Mishukova G. I. et al. Methane flux into the atmosphere in the South China Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2019. P. 1. V. 486. P. 533—536. doi.org/10.1134/S1028334X19050064.
15. Старобинец И. С. Газеохимические показатели нефтегазоносности и прогноз состава углеводородных скоплений. Москва. Недра. 1986. 200 с.
16. Mishukova G. I., Shakirov R. B. Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the water-atmosphere interface in the western Sea of Okhotsk // *Water Resources*. 2017. V. 44, N 4. P. 662—672. doi.org/10.1134/S0097807817040133.
17. Новигатский А. Н., Беликов И. Б., Белоусов В. А. и др. Результаты судовых измерений метана над Северной Атлантикой и прилегающей Арктикой летом 2020 г. // *Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)*. Труды X Международной научно-практической конференции. 2021. Том III (III). С. 72—75.
18. Dafner E., Obzhiriv A., Vereshzhagina O. Distribution of methane in waters of the Okhotsk and western Bering Seas and the area of the Kuril Islands // *Hydrobiologia*. 1997. V. 362. P. 93—101. doi.org/10.1023/A:1003114031011.
19. Weniger P., Blumenberg M., Berglar K. et al. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments // *Marine and Petroleum Geology*. 2019. V. 102. P.455—476. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.036.
20. Jaśniewicz D., Klusek Z., Brodecka-Goluch A. et al. Acoustic investigations of shallow gas in the southern Baltic Sea (Polish Exclusive Economic Zone): a review // *Geo-Marine Letters*. 2019. V. 39. P. 1—17. doi.org/10.1007/s00367-018-0555-5.
21. Mazzini A., Ivanov M.K., Parnell J. et al. Methane related authigenic carbonates from the Black Sea geochemical characterization and relation to seeping fluids // *Marine Geology*. 2004. V. 212. P. 153—181. doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.001.
22. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2007. 475 p.
23. Hovland M., Judd A. G., King L. H. Characteristic features of pockmarks on the North Sea Floor and Scotian Shelf // *Sedimentology*. 1984. No. 31. P. 471—480. doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01813.x.
24. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review // *Earth-Science Reviews*. 2017. V. 168. P. 81—112. doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001.
25. Kennicut M. C., Brooks J. M., Bidigare R. J. R. et al. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Luisiana slope // *Nature*. 1985. V. 317. P. 351—353. doi:10.1038/317351a0.
26. Мишукова Г. И., Яцук А. В., Шакиров Р. Б. Распределение потоков метана на границе вода—атмосфера в различных районах Мирового океана // *Геосистемы переходных зон*. 2021. Т. 5. № 3. с. 240—254. doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.240-247.247-254.
27. Lammers S., Suess E., Mansurov M. N. et al. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9 (3). P. 351—358. doi.org/10.1029/95GB01144.
28. Mishukova G. I., Shakirov R. B., Obzhiriv A. I. Methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475(2). P. 963—967. doi.org/10.1134/S1028334X17080256.

29. Мишукова Г. И., Мишуков В. Ф., Обжиров А. И. Распределение метана и его потоки на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 36—43.
30. Адушкин В. В., Кудрявцев В. П. Об эмиссии метана в Арктическом регионе // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4(23). С. 1—9. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art64.
31. Антонов К. Л., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. и др. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в Арктическом регионе России // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
32. Шакиров Р. Б., Мишукова Г. И. Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 107—123. doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123.
33. Obzhirov A. I., Pestrikova N. L., Mishukova G. I. et al. Distribution of methane content and methane fluxes in the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and near-Kuril Pacific // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41(3). P. 205—212. doi.org/10.3103/S1068373916030067.
34. Abrams M. A. Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments // American Association Petroleum Geology Memoir. 1996. P. 1.—14. doi:10.1306/d9cb6943-1715-11d7-8645000102c1865d.
35. Abrams M. A. Interpretation of surface methane carbon isotopes for detection of subsurface hydrocarbons. American Association Petroleum Geology Bulletin, 1987. Vol. 71/5. 524 p.
36. Macdonald I., Boland G., Baker J. et al Gulf of Mexico hydrocarbon seep communities // Marine Biology. 1989. V. 101. P. 235—247. DOI: 10.1007/BF00391463.
37. Roberts H. H., Carney R. S. Evidence of episodic fluid, gas, and sedimentary venting on the northern Gulf of Mexico continental slope // Economic Geology. 1997. Vol. 92 (7—8). P. 863—879. doi.org/10.2113/gsecongeol.92.7-8.863.
38. Abrams M. A., Narimanov A. A. Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology. 1997. Vol. 14(4). P. 451—468. doi:10.1016/s0264-8172(97)00011-1.
39. Solomon E. A., Kastner M., MacDonald I. R., Leifer I. Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico // Nature Geoscience. 2009. Vol. 2(8). P. 561—565. doi:10.1038/ngeo574.
40. Abrams M. A. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska // Marine and Petroleum Geology Bulletin. 1992. Vol. 9. P. 208—221. doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-S.
41. Schumacher D., Abrams M. A. Hydrocarbon migration and its near surface migration, AAPG Memoir 66, 1996, p. 441. DOI:10.1306/M66606.
42. Horvitz L. Geochemical Exploration for Petroleum // Science. 1985. Vol. 229. P. 821—827 DOI: 10.1126/science.229.4716.821.
43. Levinson A. A. Introduction to exploration geochemistry. Applied Pub. 1980, 924 p.
44. Price L. C. Aqueous Solubility of Petroleum as Applied to Its Origin and Primary Migration // AAPG Bulletin. 1976. Vol. 60 (2). P. 213—244. doi: https://doi.org/10.1306/83D922A8-16C7-11D7-8645000102C1865D.
45. Fischer P. J., Stevenson A. J. Natural hydrocarbon seeps along the northern shelf of the Santa Barbara Basin // California: Offshore Technology Conference, 1973. P. 159—166. doi.org/10.4043/1738-MS.
46. Reitsemä R. H., Linberg F. A., Kaltenback A. J. Light hydrocarbons in Gulf of Mexico water: sources and relation to structural highs // Journal of Geochemical Exploration. 1978. V. 10. P. 139—151. doi.org/10.1016/0375-6742(78)90014-6.
47. Clayton C., Hay S. Gas migration mechanisms from accumulation to surface // Geology. 1994. No. 6. P. 12—23. doi.org/10.37570/bgsd-1995-41-03.
48. Whelan T., Coleman J. M., Shuayada J. N. The geochemistry of recent Mississippi river delta: gas concentrations and sediment stability // Proceedings of the 7th Offshore Technology Conference. 1975. V. 3. P. 71—84. doi.org/10.4043/2342-MS.
49. Zhizhchenko B. P. Generation of hydrocarbon gases in recent marine sediments // International Geology Review. 1978. V. 21. No. 4. P. 163—170. doi.org/10.1080/00206818209467081.

50. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps // *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6(9). P. 725—734. doi:10.1038/ngeo1926.
51. Silyakova A., Jansson P., Serov P. et al. Physical controls of dynamics of methane venting from a shallow seep area west of Svalbard // *Continental Shelf Research*. 2019 Vol. 194. P. 104030. doi:10.1016/j.csr.2019.104030.
52. Kvenvolden K. A., Field M. F. Thermogenic hydrocarbons in unconsolidated sediment of Eel River Basin, offshore northern California // *AAPG Bulletin*. 1981. V. 65 (9). P. 1642—1646. doi.org/10.1306/03B5963E-16D1-11D7-8645000102C1865D.
53. Anderson R. K., Scalan R. S., Parker P. L. et al. Seep oil and gas in Gulf of Mexico slope sediments // *Science*. 1983. V. 222(4624). P. 619—621. doi: 10.1126/science.222.4624.619.
54. Sechman H., Kotarba M. J., Kędzior S. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone, genetic implications, and evaluation of gas flux around abandoned shafts in the Jastrzębie-Pszczyna area (southern part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland) // *International Journal of Coal Geology*. 2019. V. 204. P. 51—69. doi:10.1016/j.coal.2019.02.001.
55. Sechman H., Kotarba M. J., Fiszer J. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned “Nowa Ruda” coal mine (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) // *International Journal of Coal Geology*. 2013. V. 116 (117). P. 1—16. doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.005.
56. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieńiewicz M. et al. Evidence of methane and carbon dioxide migration to the near surface zone in the area of the abandoned coal mines in Wałbrzych District (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) based on periodical changes of molecular and isotopic compositions // *International Journal of Coal Geology*. 2017. V. 183. P. 138—160. doi.org/10.1016/j.coal.2017.10.011.
57. Бондур В. Г., Мохов И. И., Макоско А. А. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. М.: Российская академия наук, 2022. 388 с.
58. Люшвин П. В. Метанотрофное таяние льда // *Электронное науч. изд. Альманах пространство и время*. 2013. Т. 2. № 2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metanotrofnoe-tayanie-lda> (дата обращения: 28.03.2023).
59. Baschek B., Farmer D. M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers // *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27, No. 1. P. 241—245. doi.org/10.1175/2009JTECHNO688.1.
60. Богоявленский В. И. Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа шельфа Арктики // *Бурение и нефть*. 2012. С. 4—10.
61. ESDP European Scientific Diving Panel. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ssd.imbe.fr/SD-European-Standards?lang=fr> (дата обращения: 09.01.2022).
62. Birin I., Maglić L. Analysis of seismic methods used for subsea hydrocarbon exploration // *Pomorski zbornik*. 2020. V. 58. P. 77—89. DOI:10.18048/2020.58.05.
63. Cui W. An overview of submersible research and development in China // *Journal of Marine Science and Application*. 2018. V. 17. P. 459—470 doi.org/10.1007/s11804-018-00062-6.
64. Обжиров А. И., Телегин Ю. А., Шакиров Р. Б. Необходимость использования подводной робототехники в инженерно-геологических изысканиях в районе газовых проявлений. // *Технические проблемы освоения Мирового океана: материалы Восьмой всероссийской научно-технической конференции, 30 сентября — 3 октября 2019 г. Владивосток*. 2019. С. 23—31.
65. Verdun J., Klingele E., Bayer R. B. The Alpine Swiss-French Airborne Gravity Survey // *Geophysical Journal International*. 2003. V. 152. P. 8—19. doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01748.x.
66. Wenyong L., Jianxin Z., Shengqing X. et al. Effect and Prospect of Basic Geological Survey Based on Airborne Gravimetry in China // *Acta Geologica Sinica — English Edition*. 2012. V. 86(1). P. 38—47. doi:10.1111/j.1755-6724.2012.00609.x.
67. Михайлов П. С., Железняк Л. К., Конешов В. Н. и др. Современные технологии программно-математического и методического сопровождения морских гравиметрических съемок // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского — В. Н. Страхова. Воронеж, 27 января — 30 января 2020 г.* 2020. С. 205—208.
68. Конешов В. Н., Костицын В. И. Аппаратура и технологии гравиразведки и магниторазведки: авиационные и морские гравиметры: учебное пособие. Пермь: ПГНИУ, 2021. 108 с.

69. Конешов В. Н., Железняк Л. К., Михайлов П. С. и др. Развитие технологий морских гравиметрических исследований в Арктике // Труды IX международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» 2020. Том III (III). С. 518—521.
70. Kearey P., Brooks M., Hill I. An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd, 3rd edh, 2016. 155 p.
71. Нерсесов Б. А. Методы вероятностной оценки эффективности средств морской магнитометрии // Океанологические исследования. 2019. Том 47. No 4. С. 152—160 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).10.
72. Gorodnitskiy A. M., Brusilovskiy Y. V., Ivanenko et al. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas // Geoscience Frontiers. 2013. V. 4(1). P. 73—85. doi:10.1016/j.gsf.2012.06.002.
73. Mostafaei K., Kianpour M. Application of Magnetometry in Manto-type Copper Deposit Exploration, Case study: Meyami, Iran // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. V. 37(5). P. 1—14. DOI: 10.17794/rgn.2022.5.1.
74. De Castro D. L. Gravity and magnetic joint modeling of Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation // Journal of South American Earth Sciences. 2011. V. 31. P. 186—198. doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005.
75. Vitte L. V., Vasilevskiy A. N. Geologic nature of regional magnetic and gravity anomalies in Mongol-Transbaikalian province of the central Asian Fold Belt // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. P. 1442—1449. doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.011.
76. Ампилов Ю. П. Сейсморазведка на российском шельфе в условиях санкций и низких цен на нефть // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 5—14. DOI: 10.18303/1813-4254-2015-4-5-14.
77. Isaenkov R., Ponimaskin A. I., Tokarev M. J. Processing workflow for the dynamic interpretation of very high-resolution P-wave seismic data // EAGE Near Surface Geoscience 2016 — Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference. 2016. V. 2016. P. 1—5. doi.org/10.3997/2214-4609.201602154.
78. Ampilov Y. P., Vladov M. L., Tokarev M. Y. Broadband Marine Seismic Acquisition Technologies: Challenges and Opportunities // Seismic Instruments. 2019. V. 55(4). P. 388—403. doi: 10.3103/s0747923919040030.
79. Min L. O. U., Hua C. A. I., Xianke H. E. et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag, East China Sea shelf basin // Petroleum Exploration and Development. 2023. V. 50(1). P. 138—151 doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60375-6.
80. Putikov O., Kholmymanski M., Ivanov G. et al. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf // Geochemistry. 2020. V. 80 (3). P. 125498. doi:10.1016/j.geoch.2019.02.001.
81. Черных Д. В., Юсупов В. И., Саломатин А. С. и др. Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения — водная толща и его реализация на примере моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. 153—167. doi.org/10.18799/24131830/2018/11/218.
82. Ampilov Y. P., Terekhina Y. E., Tokarev M. Y. Applied Aspects of Different Frequency Bands of Seismic and Water Acoustic Investigations on the Shelf // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55(7). P. 705—720. doi:10.1134/s0001433819070028.
83. Буланов В. А., Корсков И. В., Стороженко А. В. и др. Исследования акустических характеристик верхнего слоя моря методом многочастотного акустического зондирования // Средства и методы подводных исследований 2020. No. 1 (31). С. 42—55. DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.006.
84. Жаворонкин О. В., Трегуб А. И. Дистанционное зондирование Земли при геологических исследованиях. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. 46 с.
85. Денисов Ю. В., Райкунов Г. Г., Трофимов Д. М. Дистанционные методы поисков месторождений нефти и газа на морских акваториях. Монография. Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. 68 с.
86. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
87. Landsat Science [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (дата обращения: 28.05.2023).

88. Aqua Earth-observing satellite mission [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aqua.nasa.gov/> (дата обращения: 28.05.2023).
89. Российские космические системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/resurs-p/> (дата обращения: 28.05.2023).
90. The official website of the Government of Canada [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/> (дата обращения: 28.05.2023).
91. The European Space Agency [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x> (дата обращения: 29.05.2023).
92. Российские космические системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/kanopus-v/> (дата обращения: 29.05.2023).
93. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Исследования естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям // *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса*. 2012. С. 272—287.
94. Бондур В. Г. *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса*. М: Научный мир, 2012. 558 с.
95. Каримов К. М., Онегов В. Л., Кокутин С. Н. и др. Дистанционное тепловизионное зондирование Земли при решении геологических задач // *Георесурсы*. 2009. №. 1(29). С. 38—42.
96. Зенченко С. С. Методы и результаты эффективного применения современных тепловизионных средств измерения гидрофизических процессов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. №. 2(396). С. 134—138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.
97. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Глок Н. И. К оценке теплосодержания Мирового океана по спутниковым данным о температуре поверхностного слоя воды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 3. С. 201—207.
98. Малинин В. Н., Глок Н. И. Использование спутниковых данных о температуре поверхностного слоя воды для оценки стерических колебаний уровня Мирового океана // *Исследование Земли из космоса*. 2014, № 3. С. 27—32.
99. Мухамедяров Р. Д., Дабаев А. И. Инновационная технология «МВТГМ» для поиска нефтегазовых месторождений и решения геотехногенных задач // *Труды общества нефтяников-геологов Казахстана*. 2014. Вып. 4. С. 293—295.
100. Мухамедяров Р. Д., Туманов В. Р. Геолого-геофизические значение метода видеотепловизионной генерализации // *Инновации и технологии в разведке, добыче и переработке нефти и газа*. 2010. С. 307—312.
101. Ellis J. M., Davis H. H., Zamudio J. A. Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging // *Oil & Gas Journal*. 2001. V. 99. P. 49—58.
102. Van Der Meer F., Van Dijk P., Van Der Werff H. et al. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study // *Terra Nova*. 2002. V. 14. P. 1—17. doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00390.x.
103. Almeida-Filho R. Remote detection of hydrocarbon microseepage induced soil alteration // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. V. 23. P. 3523—3524. DOI: 10.1080/01431160210137712.
104. Boulart C., Connelly D. P., Mowlem M. C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels // *Trends in Analytical Chemistry*. 2010. V. 29, No. 2. P. 186—195. doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001.
105. Салюк П. А., Буланов В. А., Корсков И. В. и др. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // *Подводные исследования и робототехника*. 2011. № 2(12). С. 43—51.
106. Barbini R., Colao F., Fantoni R. et al. Differential lidar fluorecensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. V. 22. No. 2/3. P. 369—384. DOI: 10.1080/014311601449989.
107. Bukin O. A., Mayor A. Yu., Pavlov V. A. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // *International Journal of Remote Sensing*. 1998. V. 19. No. 4. P. 707—717. DOI: 10.1080/014311698215946.
108. Майор А. Ю., Букин О. А., Крикун В. А. и др. Компактный судовой проточный флуориметр // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 3. С. 283—285.

109. Carstea E. M., Baker A., Bierzo M. et al. Continuous fluorescence excitation–emission matrix monitoring of river organic matter // *Water Research*. 2010. V. 44(18). P. 5356—5366. doi:10.1016/j.watres.2010.06.036.
110. White H., Commy R., MacDonald I. et al. Methods of Oil Detection in Response to the Deepwater Horizon Oil Spill // *Oceanography*. 2016. V. 29(3). P. 76—87. doi:10.5670/oceanog.2016.72.
111. Colcomb K., Salt D., Peddar M. et al. Determination of the limiting oil viscosity for chemical dispersion at sea. // *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2005. V. 1. P. 53—58. doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-53.
112. SMART. 2006. Special Monitoring of Applied Response Technologies Protocol Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, U.S. Environmental Protection Agency, 43 pp.
113. Проценко Д. Ю., Голик С. С., Майор А. Ю. и др. Разработка метода лазерной искровой спектроскопии для задач геологоразведки и экологического мониторинга водных сред в режиме реального времени // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2021. № 1. С. 112—119. doi:10.21685/2072-3040-2021-1-9.
114. Thornton B., Takahashi T., Sato T. Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2015. V. 95. P. 20—36. doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.006.
115. Nakanishi R., Ohba H., Saeki M. et al. Highly sensitive detection of sodium in aqueous solutions using laser-induced breakdown spectroscopy with liquid sheet jets // *Optics Express*. 2021. V. 29 (4). P. 5205—5212. DOI:10.1364/OE.415308.
116. Sakka T., Takatani K., Ogata Y. H. et al. Laser ablation at the solid–liquid interface: transient absorption of continuous spectral emission by ablated aluminium atoms // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 35. № 1. P. 65. DOI: 10.1088/0022-3727/35/1/312.
117. Tian Y., Hou S., Wang L. et al. CaOH Molecular Emissions in Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Spatial–Temporal Characteristics and Analytical Performances // *Analytical chemistry*. 2019. V. 91. № 21. P. 13970—13977. doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03513.
118. Masamura T., Thornton B., Ura T. Spectroscopy and imaging of laser-induced plasmas for chemical analysis of bulk aqueous solutions at high pressures // *OCEANS’11 MTS/IEEE KONA*. 2011. P. 1—6. doi: 10.23919/OCEANS.2011.6107194.
119. Golik S. S., Ilyin A. A., Kolesnikov A. V. et al. The influence of laser focusing on the intensity of spectral lines in femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of liquids // *Technical Physics Letters*. 2013. V. 39(8). P. 702—704. doi:10.1134/s106378501308004x.
120. Dong Bao, Dengxin Hua, Hao Qi et al. Investigation of a Raman scattering spectral model for seawater containing a composite salt solute // *Optic Express*. 2022. V. 30 (5). P. 6713—6725. doi.org/10.1364/OE.450250.
121. Pinto R., Vilarinho R., Carvalho A. P. et al. Raman spectroscopy applied to diatoms (microalgae, Bacillariophyta): Prospective use in the environmental diagnosis of freshwater ecosystems // *Water Research*. 2021. V. 198. P. 117102. doi:10.1016/j.watres.2021.117102.
122. White S. N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy // *Applied spectroscopy*. 2010. V. 64, No. 7. P. 819—827. DOI: 10.1366/000370210791666354.
123. Somekawa T., Fujita M. Raman spectroscopy measurement of CH₄ gas and CH₄ dissolved in water for laser remote sensing in water // *EPJ Web of Conferences*. 2018. V. 176. P. 01021. doi:10.1051/epjconf/201817601021.
124. Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. Raman spectroscopy for offshore hydrocarbon deposits detection // *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. 2022. P. 1—1. doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840226.
125. Shiyu C., Guangming Z., Kai W. et al. Raman spectroscopic and microscopic monitoring of on-site and in-situ remediation dynamics in petroleum contaminated soil and groundwater // *Water Research*. 2023. V. 233. P. 119777. doi.org/10.1016/j.watres.2023.119777.
126. Hiraga Y., Sasagawa T., Yamamoto S. et al. A precise deconvolution method to derive methane hydrate cage occupancy ratios using Raman spectroscopy // *Chem. Eng. Sci.* 2020. V. 214. P. 115361. DOI:10.1016/j.ces.2019.115361.

127. Tulk C. A., Ripmeester J. A., Klug D. D. The application of Raman spectroscopy to the study of gas hydrates // *Gas hydrates: challenges for the future*. 2000. V. 912(1). P. 859—872 doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06840.x.
128. Schicks J. M., Pan M., Giese R. et al. A new high-pressure cell for systematic in situ investigations of micro-scale processes in gas hydrates using confocal micro-Raman spectroscopy // *Rev Sci Instrum.* 2020. V. 91 (11). P. 115103. doi.org/10.1063/5.0013138.
129. Guillaume D., Teinturier S., Dubessy J. et al. Calibration of methane analysis by Raman spectroscopy in H₂O–NaCl–CH₄ fluid inclusions // *Chemical Geology*. 2003. V. 194(1—3). P. 41—49. doi:10.1016/s0009-2541(02)00270-x.
130. Singh J., Muller A. Ambient Hydrocarbon Detection with an Ultra-Low-Loss Cavity Raman Analyzer // *Analytical Chemistry*. 2023. V. 95 (7). P. 3703—3711. DOI: 10.1021/acs.analchem.2c04707.
131. Zhevlakov A. P., Bepalov V. G., Grishkanich A. S. et al. Oil and gas deposits determination by ultraspectral lidar // *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII*. 2015. V. 9112 P. 91121F. doi.org/10.1117/12.2049920.
132. Kascheev S. V., Elizarov V. V., Grishkanich A. S. et al. Upgraded raman lidar with ultraspectral resolution // 2014 International Conference Laser Optics, St. Petersburg, Russia. 2014. P. 1—1. doi: 10.1109/LO.2014.6886397.
133. Chubchenko I., Popov E., Grigorenko K. et al. Raman Gas Analyzer of Carbon Isotopologues with 50 ppm Level Sensitivity // 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). 2021. P. 1—I. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541690.
134. Vikin V., Polishchuk A., Chubchenko I. et al. Raman laser spectrometer: Application to 12 C/ 13 C isotope identification in CH₄ and CO₂ greenhouse gases // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. No. 21. P. 7473. doi.org/10.3390/app10217473.
135. Moore C., Barnard A., Fietzek P. et al. Optical tools for ocean monitoring and research // *Ocean Science*. 2009. V. 5(4). P. 661—684. doi:10.5194/os-5-661-2009.
136. Chen S., Wang J., Zhang C. et al. Marine Structural Health Monitoring with Optical Fiber Sensors: A Review // *Sensors*. 2023. V. 23. P. 1877. doi.org/10.3390/s23041877.
137. Min R., Liu Z., Pereira L. et al. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 140. P. 107082. doi:10.1016/j.optlastec.2021.107082.
138. Chakravartula V., Rakshit S., Dhanalakshmi S. et al. Linear Temperature Distribution Sensor Using FBG in Liquids—Local Heat Transfer Examination Application // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. No. 15. P. 16651—16658. doi: 10.1109/JSEN.2021.3078731.
139. Wynn R. B., Huvenne V. A. I., Le Bas T. P. et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 451—468. doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012.
140. Baggio A., Turani M., Olivero M. et al. Selective distributed optical fiber sensing system based on silicone cladding optical fiber and Rayleigh backscattering reflectometry for the detection of hydrocarbon leakages // *Optics & Laser Technology*. 2023. V. 161. P. 109—158. doi.org/10.2139/ssrn.4108008.
141. Arief H. A., Wiktorski T., Thomas P. J. A Survey on Distributed Fibre Optic Sensor Data Modelling Techniques and Machine Learning Algorithms for Multiphase Fluid Flow Estimation // *Sensors*. 2021. V. 21. No.8. P. 2801. doi.org/10.3390/s21082801.
142. Totland C., Thomas P. J., Størdal I. F. et al. A Fully Distributed Fibre Optic Sensor for the Detection of Liquid Hydrocarbons // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. No. 6. P. 7631—7637 doi: 10.1109/JSEN.2020.3047549.
143. Tanimola F., Hill D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2009. V.1 (4—5). P. 134—143. doi: 10.1016/j.jngse.2009.08.002.
144. Ампилов Ю. П. Анализ погрешностей сейсморазведки при моделировании месторождений углеводородов и прогнозе подсчетных параметров // *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2004. С. 37—00024. doi.org/10.3997/2214-4609.201405518.
145. Мухамедяров Р. Д. Метод видеотепловизионной генерализации и его геотехногенное значение // *Вестник казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2012. №1. С. 60—66.

146. Conmy R. N., Coble P. G., Farr J. et al. Submersible Optical Sensors Exposed to Chemically Dispersed Crude Oil: Wave Tank Simulations for Improved Oil Spill Monitoring // *Environmental Science & Technology*. 2014. V. 48(3). P. 1803—1810. doi:10.1021/es404206y.
147. Царев В. И., Букин О. А., Голик С. С. и др. Применение метода лазерной искровой спектроскопии в экологических исследованиях // *Исследовано в России*. 2003. С. 2108—2116. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2003/174.pdf> (дата обращения: 04.04.2023).

References

1. Zhai M., Hu R., Wang Y. et al. Mineral resource science in China: Review and perspective. *Geography and Sustainability*. 2021; (2):107—114. doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002.
2. Ponomarev A. S., Pozdnyakov A. S. Modern trends in the development of the global sector of offshore hydrocarbon production. *Territoriya «NEFTEGAZ» = The territory of “NEFTEGAZ”* 2018; (11):(40—50). (In Russ.).
3. Makarov A. A., Grigoriev L. M., Mitrova T. A. *World and Russian Energy Outlook up to 2040*. Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2013: 110 p.
4. Vasiltsova V. M. Problems of development of offshore oil and gas fields. *Zapiski Gornogo instituta = Notes of the Mining Institute*. 2016. Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-osvoeniya-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti-i-gaza> (accessed on: 04.04.2023). (In Russ.).
5. Wolfe K. J., Parker, G. J., Sellars S. L. Hebron Offshore Development Project Overview. *Offshore Technology Conference*. 2018: 1—12. doi: 10.4043/28695-ms.
6. Mark J., Kaiser A Review of Exploration, Development, and Production Cost Offshore Newfoundland. *Natural Resources Research*. 2021; 30(2): 1253—1290. doi.org/10.1007/s11053-020-09784-3.
7. Jahn F., Cook M., Graham M. *Hydrocarbon Exploration and Production*. Elsevier Science: Amsterdam. The Netherlands, 2008: 456 p.
8. Picard K., Radke L. C., Williams D. K. et al. Origin of high density seabed pockmark fields and their use in inferring bottom currents. *Geosciences*. 2018; 8(6): 195. doi.org/10.3390/geosciences8060195.
9. Zemtsova M. N., Bormasheva K. M., Moiseev I. K. *Uglevodorody: uchebnoye posobiye = Hydrocarbons: textbook*. Samara: Samara State Technical University, 2016: 147 p. (In Russ.).
10. Rovere M., Mercorella A., Frapiccini E. et al. Geochemical and Geophysical Monitoring of Hydrocarbon Seepage in the Adriatic Sea. *Sensors*. 2020; 20(5): 1504. doi.org/10.3390/s20051504.
11. Kvenvolden K. A. Methane hydrate — A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*. 1988; (71):41—51. doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0.
12. Le D. L., Obzhairov A. I., Nguyen H. et al. Distribution of gases in bottom sediments of the southwestern sub-basin of the South China sea (Bien Dong). *Tihookeanskaya geologiya = Pacific geology*. 2021; 40(2):(67—77). (In Russ.). DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-2-67-77.
13. Shakirov R. B., Lan N.H., Yatsuk A. et al. Methane flux into the atmosphere in the Bien Dong (East Sea of Vietnam). *Journal of Marine Science and Technology*. 2018; 18(3): 250—255. DOI: 10.15625/1859-3097/18/3/12696.
14. Shakirov R. B., Yatsuk A. V., Mishukova G. I. et al. Methane flux into the atmosphere in the South China Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2019; 1(486): 533—536 doi.org/10.1134/S1028334X19050064.
15. Starobinets I. S. *Gazogeoimicheskie pokazateli neftegazonosnosti i prognoz sostava zalezhej uglevodorodov = Gas-geochemical indicators of oil and gas content and forecast of the composition of hydrocarbon accumulations*. Nedra: Moscow 1986: 200 p. (In Russ.).
16. Mishukova G. I., Shakirov R. B. Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the wateratmosphere interface in the western Sea of Okhotsk. *Water Resources*. 2017; 44 (4): 662—672. doi.org/10.1134/S0097807817040133.
17. Novigatsky A. N., Belikov I. B., Belousov V. A. et al. Results of ship measurements of methane over the northern Atlantic and the adjacent Arctic in summer 2020. *Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2021). Trudy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Marine Research and Education (MARESEDU-2021). Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference*. 2021; III (III): 72—75. (In Russ.).

18. Dafner E., Obzhairov A., Vereshzhagina O. Distribution of methane in waters of the Okhotsk and western Bering Seas and the area of the Kuril Islands. *Hydrobiologia*. 1997; (362):93—101. doi.org/10.1023/A:1003114031011.
19. Weniger P., Blumenberg M., Berglar K. et al. Origin of near-surface hydrocarbon gases bound in northern Barents Sea sediments. *Marine and Petroleum Geology*. 2019; (102):455—476. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.036.
20. Jaśniewicz D., Klusek Z., Brodecka-Goluch A. et al. Acoustic investigations of shallow gas in the southern Baltic Sea (Polish Exclusive Economic Zone): a review. *Geo-Marine Letters*. 2019; (39):1—17. doi.org/10.1007/s00367-018-0555-5.
21. Mazzini A., Ivanov M. K., Parnell J. et al. Methane related authigenic carbonates from the Black Sea geochemical characterization and relation to seeping fluids. *Marine Geology*. 2004; (212):153—181. doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.001.
22. Judd A., Hovland M. *Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge: Cambr. Univ. Press 2007; 475 p.
23. Hovland M., Judd A. G., King L. H. Characteristic features of pockmarks on the North Sea Floor and Scotian Shelf. *Sedimentology*. 1984; (31):471—480. doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01813.x.
24. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017; (168):81—112. doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001.
25. Kennicut M. C., Brooks J. M., Bidigare R. J. R. et al. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*. 1985; (317):351—353. doi:10.1038/317351a0.
26. Mishukova G. I., Yatsuk A. V., Shakirov R. B. Distribution of methane fluxes on the water–atmosphere interface in different regions of the World Ocean. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of transition zones*. 2021; 5(3):(240—254). doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.240-247.247-254 (In Russ.).
27. Lammers S., Suess E., Mansurov M. N. et al. Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995; 9 (3): 351—358. doi.org/10.1029/95GB01144.
28. Mishukova G. I., Shakirov R. B., Obzhairov A. I. Methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*. 2017; 475(2): 963—967 doi.org/10.1134/S1028334X17080256.
29. Mishukova G. I., Mishukov V. F., Obzhairov A. I. Distribution of Methane and Its Fluxes at the Water–Atmosphere Boundary in Some Regions of the Sea of Okhotsk. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of the FEB RAS*. 2010; (6):(36—43). (In Russ.).
30. Adushkin V. V., Kudryavtsev V. P. On methane emission in the Arctic. *Aktual'nye problemy nefti i gaza = Actual problems of oil and gas*. 2018; 4(23):(1—9). (In Russ.). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art64.
31. Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Yu. I. et al. Some results of greenhouse gases monitoring in the Arctic region of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2018; 1(29):(56—67). (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
32. Shakirov R. B., Mishukova O. V. The spatial distribution of the methane fluxes on the water-atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of transition zones*. 2019; 3(1):(107—123). (In Russ.). doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123.
33. Obzhairov A. I., Pestrikova N. L., Mishukova G. I. et al. Distribution of methane content and methane fluxes in the Sea of Japan, Sea of Okhotsk, and near-Kuril Pacific. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016; 41(3): 205—212. doi.org/10.3103/S1068373916030067.
34. Abrams M. A. Distribution of subsurface hydrocarbon seepage in near-surface marine sediments. *American Association Petroleum Geology Memoir*. 1996; (77):1—14. doi:10.1306/d9cb6943-1715-11d7-8645000102c1865d.
35. Abrams M. A. Interpretation of surface methane carbon isotopes for detection of subsurface hydrocarbons. *American Association Petroleum Geology Bulletin*. 1987; 71/5: 524. doi.org/10.1306/M66606C22.
36. Macdonald I., Boland G., Baker J. et al. Gulf of Mexico hydrocarbon seep communities. *Marine Biology*. 1989; (101):235—247. DOI: 10.1007/BF00391463.
37. Roberts H. H., Carney R. S. Evidence of episodic fluid, gas, and sedimentary venting on the northern Gulf of Mexico continental slope. *Economic Geology*. 1997; 92 (7—8): 863—879. doi.org/10.2113/gsecongeo.92.7-8.863.

38. Abrams M. A., Narimanov A. A. Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*. 1997; 14(4): 451—468. doi:10.1016/s0264-8172(97)00011-1.
39. Solomon E. A., Kastner M., MacDonald I. R., Leifer I. Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico. *Nature Geoscience*. 2009; 2(8): 561—565. doi:10.1038/ngeo574.
40. Abrams M. A. Geophysical and geochemical evidence for subsurface hydrocarbon leakage in the Bering Sea, Alaska. *Marine and Petroleum Geology Bulletin*. 1992; (9):208—221. doi.org/10.1016/0264-8172(92)90092-S.
41. Schumacher D., Abrams M. A. Hydrocarbon migration and its near surface migration, *AAPG Memoir*. 1996; 66: 441 p. DOI:10.1306/M66606.
42. Horvitz L. Geochemical Exploration for Petroleum. *Science*. 1985; (229):821—827. DOI: 10.1126/science.229.4716.821.
43. Levinson A. A. *Introduction to exploration geochemistry*. Applied Pub. 1980: 924 p.
44. Price L. C. Aqueous Solubility of Petroleum as Applied to Its Origin and Primary Migration. *AAPG Bulletin*. 1976; 60(2): 213—244. doi: <https://doi.org/10.1306/83D922A8-16C7-11D7-8645000102C1865D>.
45. Fischer P. J., Stevenson A. J. Natural hydrocarbon seeps along the northern shelf of the Santa Barbara Basin. *California: Offshore Technology Conference*. 1973: 159—166. doi.org/10.4043/1738-MS.
46. Reitsema R. H., Linberg F. A., Kaltenback A. J. Light hydrocarbons in Gulf of Mexico water: sources and relation to structural highs. *Journal of Geochemical Exploration*. 1978; (10):139—151. doi.org/10.1016/0375-6742(78)90014-6.
47. Clayton C., Hay S. Gas migration mechanisms from accumulation to surface. *Geology*. 1994; (6):12—23. doi.org/10.37570/bgsd-1995-41-03.
48. Whelan T., Coleman J. M., Shuayada J. N. The geochemistry of recent Mississippi river delta: gas concentrations and sediment stability. *Proceedings of the 7th Offshore Technology Conference*. 1975; (3):71—84. doi.org/10.4043/2342-MS.
49. Zhizhchenko B. P. Generation of hydrocarbon gases in recent marine sediments. *International Geology Review*. 1978; 21(4):163—170. doi.org/10.1080/00206818209467081.
50. Boetius A., Wenzhöfer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nature Geoscience*. 2013; 6(9): 725—734. doi:10.1038/ngeo1926.
51. Silyakova A., Jansson P., Serov P. et al. Physical controls of dynamics of methane venting from a shallow seep area west of Svalbard. *Continental Shelf Research*. 2019; 194: 104030. doi:10.1016/j.csr.2019.104030.
52. Kvenvolden K. A., Field M. F. Thermogenic hydrocarbons in unconsolidated sediment of Eel River Basin, offshore northern California. *AAPG Bulletin*. 1981; 65(9): 1642—1646. doi.org/10.1306/03B5963E-16D1-11D7-8645000102C1865D.
53. Anderson R. K., Scalan R. S., Parker P. L. et al. Seep oil and gas in Gulf of Mexico slope sediments. *Science*. 1983; 222(4624): 619—621. doi: 10.1126/science.222.4624.619.
54. Sechman H., Kotarba M. J., Kędzior S. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone, genetic implications, and evaluation of gas flux around abandoned shafts in the Jastrzębie-Pszczyna area (southern part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland). *International Journal of Coal Geology*. 2019; (204):51—69. doi: 10.1016/j.coal.2019.02.001.
55. Sechman H., Kotarba M. J., Fiszler J. et al. Distribution of methane and carbon dioxide concentrations in the near-surface zone and their genetic characterization at the abandoned “Nowa Ruda” coal mine (lower Silesian Coal Basin, SW Poland). *International Journal of Coal Geology*. 2013; 116 (117): 1—16. doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.005.
56. Sechman H., Kotarba M. J., Dzieniewicz M. et al. Evidence of methane and carbon dioxide migration to the near surface zone in the area of the abandoned coal mines in Wałbrzych District (lower Silesian Coal Basin, SW Poland) based on periodical changes of molecular and isotopic compositions. *International Journal of Coal Geology*. 2017; (183):138—160. doi.org/10.1016/j.coal.2017.10.011.
57. Bondur V. G., Mokhov I. I., Macosco A. A. *Метан и изменение климата: научные проблемы и технологические аспекты = Methane and climate change: scientific problems and technological aspects*. М.: Russian Academy of Sciences, 2022: 388 p. (In Russ.).

58. Lushvin P. V. Methanotrophic Ice Thawing. *Elektronnoe nauch. izd. Al'manah prostranstvo i vremya = Electronic scientific ed. Almanac space and time*. 2013; 2 (2). Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/metanotrofnoe-tayanie-lda> (accessed on 28.03.2023). (In Russ.).
59. Baschek B., Farmer D. M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*. 2010; 27 (1): 241—245. doi.org/10.1175/2009JTECHO688.1.
60. Bogoyavlensky V. Prospects and problems of the arctic shelf oil and gas fields development. *Burenie i neft' = Drilling and oil*. 2012: 4—10 (In Russ.).
61. ESDP European Scientific Diving Panel. Available online: <http://ssd.imbe.fr/SD-European-Standards?lang=fr> (accessed on 09.01.2022).
62. Birin I., Maglić L. Analysis of seismic methods used for subsea hydrocarbon exploration. *Pomorski zbornik*. 2020; (58):77—89. DOI:10.18048/2020.58.05.
63. Cui W. An overview of submersible research and development in China. *Journal of Marine Science and Application*. 2018; (17):459—470. doi.org/10.1007/s11804-018-00062-6.
64. Obzhairov A. I., Telegin Yu. A., Shakirov R. B. The need to use underwater robotics in engineering and geological surveys in the area of gas manifestations. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana: materialy Vos'moj vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 30 sentyabrya — 3 oktyabrya 2019 g. Vladivostok = Technical problems of the development of the World Ocean: materials of the Eighth All-Russian Scientific and Technical Conference, September 30 — October 3, 2019 Vladivostok*. 2019: 23—31 (In Russ.).
65. Verdun J., Klingele E., Bayer R. B. The Alpine Swiss-French Airborne Gravity Survey. *Geophysical Journal International*. 2003; (152):8—19. doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01748.x.
66. Wenyong L., Jianxin Z., Shengqing X. et al. Effect and Prospect of Basic Geological Survey Based on Airborne Gravimetry in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2012; 86(1): 38—47. doi:10.1111/j.1755-6724.2012.00609.x.
67. Mikhailov P. S., Zheleznyak L. K., Koneshov V. N. et al. Modern technologies of software-mathematical and methodological support of marine gravimetric surveys. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh polej: Materialy 47-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara D. G. Uspenskogo — V. N. Strahova. Voronezh, 27 yanvarya — 30 yanvarya 2020 = Questions of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: Materials of the 47th session of the International Scientific Seminar of D. G. Uspensky — V. N. Strakhov. Voronezh, January 27 — January 30, 2020*. 2020: 25—28. (In Russ.).
68. Koneshov V. N., Kostitsyn V. I. *Oborudovanie i tekhnologii dlya gravitacionnoj i magnitnoj razvedki: aviacionnye i morskije gravimetry: uchebnoe posobie = Equipment and technologies for gravity and magnetic exploration: aviation and marine gravimeters: textbook*. Perm': PSNRU, 2021: 108 p. (In Russ.).
69. Koneshov V. N., Zheleznyak L. K., Mikhailov P. S. et al. Development of Marine Gravimetric Research Technologies in the Arctic. *Trudy IX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020)" = Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)"*. 2020; III: 518—521 (In Russ.).
70. Kearey P., Brooks M., Hill I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd, 3rd edh 2016: 155 p.
71. Nersesov B. A. Methods for Probabilistic Evaluation of the Efficiency of Marine Magnetometry Tools. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological research*. 2019; 47(4):(152—160). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(4).10 (In Russ.).
72. Gorodnitskiy A. M., Brusilovskiy Y. V., Ivanenko et al. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas. *Geoscience Frontiers*. 2013; 4(1): 73—85. doi:10.1016/j.gsf.2012.06.002.
73. Mostafaei K., Kianpour M. Application of Magnetometry in Manto-type Copper Deposit Exploration, Case study: Meyami, Iran. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022; 37(5): 1—14. DOI: 10.17794/rgn.2022.5.1.
74. De Castro D. L. Gravity and magnetic joint modeling of Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. *Journal of South American Earth Sciences*. 2011; (31):186—198. doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005.

75. Vitte L.V., Vasilevskiy A. N. Geologic nature of regional magnetic and gravity anomalies in Mongol-Transbaikalian province of the central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics*. 2013; (54):1442—1449. doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.011.
76. Ampilov Yu. P. Seismic exploration on the Russian Shelf in terms of sanctions and low oil prices. *Tekhnologii seismorazvedki = Seismic exploration technologies*. 2015; (4):(5—14). (In Russ.). DOI: 10.18303/1813-4254-2015-4-5-14.
77. Isaenkov R., Ponimaskin A. I., Tokarev M. J. Processing workflow for the dynamic interpretation of very high-resolution P-wave seismic data. *EAGE Near Surface Geoscience 2016 — Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. 2016; 2016: 1—5. doi.org/10.3997/2214-4609.201602154.
78. Ampilov Y. P., Vladov M. L., Tokarev M. Y. Broadband Marine Seismic Acquisition Technologies: Challenges and Opportunities. *Seismic Instruments*. 2019; 55(4): 388—403. doi: 10.3103/s0747923919040030.
79. Lou M., Cai H., He X. et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag, East China Sea shelf basin. *Petroleum Exploration and Development*. 2023; 50(1): 138—151. doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60375-6.
80. Putikov O., Kholmymanski M., Ivanov G. et al. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf. *Geochemistry*. 2020; 80 (3):125498 doi:10.1016/j.geoch.2019.02.001.
81. Chernykh D. V., Yusupov V. I., Salomatin A. S. A new acoustic method for quantifying the methane bubble flow in the system bottom sediments - water column and its implementation on the example of the Laptev Sea, Arctic Ocean. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2018; 329(11): 153—167. (In Russ.). doi.org/10.18799/24131830/2018/11/218.
82. Ampilov Y. P., Terekhina Y. E., Tokarev M. Y. Applied Aspects of Different Frequency Bands of Seismic and Water Acoustic Investigations on the Shelf. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019; 55(7): 705—720. doi:10.1134/s0001433819070028.
83. Bulanov V. A., Korskov I. V., Storozhenko A. V. et al. Studies of the acoustic characteristics of the upper layer of the sea by the method of multi-frequency acoustic sounding. *Sredstva i metody podvodnykh issledovaniy = Means and methods of underwater research*. 2020; 1(31):(42—55). (In Russ.). DOI: 10.37102/24094609.2020.31.1.006.
84. Zhavoronkin O. V., Tregub A. I. *Distancionnoe zondirovanie Zemli v geologicheskikh issledovaniyakh = Remote sensing of the Earth in geological studies*. Voronezh: Voronezh State University 2012: 46 p. (In Russ.).
85. Denisov Yu. V., Raikunov G. G., Trofimov D. M. *Distancionnye metody poiska mestorozhdeniy nefiti i gaza v morskikh rajonakh. Monografiya = Remote methods of searching for oil and gas deposits in marine areas. Monograph*. Vologda: Infra-Engineering 2017: 68 p. (In Russ.).
86. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoi A. G. *Sputnikovye metody identifikatsii i monitoringa zon riska dlya morskoj sredy = Satellite methods of identification and monitoring of marine environmental risk zones*. Moscow: ICI RAS 2016: 334 p. (In Russ.).
87. Landsat Science Available online: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (accessed on: 28.05.2023).
88. Aqua Earth-observing satellite mission Available online: <https://aqua.nasa.gov/> (accessed on: 28.05.2023).
89. Russian space systems Available online: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/resurs-p/> (accessed on: 28.05.2023). (In Russ.).
90. The official website of the Government of Canada Available online: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/> (accessed on: 28.05.2023).
91. The European Space Agency Available online: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x> (accessed on: 29.05.2023).
92. Russian space systems Available online: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/kanopus-v/> (accessed on: 29.05.2023). (In Russ.).
93. Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Studies of natural oil and gas shows on the sea surface using satellite images. *Aerokosmicheskij monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa = Aerospace monitoring of oil and gas facilities*. 2012: 272—287. (In Russ.).
94. Bondur V. G. *Aerokosmicheskij monitoring ob'ektov neftegazovoj otrasli=Aerospace monitoring of oil and gas facilities*. The scientific world 2012: 558 p. (In Russ.).

95. Karimov K. M., Onegov V. L., Kokutin S. N. et al. Remote thermal imaging of the Earth in solving geological problems. *Georesursy = Geo resources*. 2009; 1(29):(38—42). (In Russ.).
96. Zenchenko S. Methods and results of effective application of modern infra-red imaging technologies for measuring hydrophysical processes. *Trudy Krylovskogo Gosudarstvennogo Nauchnogo Centra = Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2021; 2(396):(134—138). (In Russ.). DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.
97. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Glock N. I. On the assessment of the heat content of the World Ocean from satellite data on the temperature of the surface layer of water. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2013; 10(3):(201—207). (In Russ.).
98. Malinin V. N., Glock N. I. The use of satellite data on the temperature of the surface layer of water to assess steric fluctuations in the level of the World Ocean. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*. 2014; (3):(27—32). (In Russ.).
99. Mukhamedyarov R. D., Dabaev A. I. Innovative technology “MVTGM” for searching for oil and gas fields and solving geotechnogenic problems. *Trudy obshchestva neftyanikov-geologov Kazakhstana = Proceedings of the Society of Petroleum Geologists of Kazakhstan*. 2014; (4):(293—295). (In Russ.).
100. Mukhamedyarov R. D., Tumanov V. R. Geological and geophysical significance of the method of video thermal imaging generalization. *Innovacii i tekhnologii v razvedke, dobyche i pererabotke nefi i gaza = Innovations and technologies in oil and gas exploration, production and processing*. 2010: 307—312. (In Russ.).
101. Ellis J. M., Davis H. H., Zamudio J. A. Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging. *Oil & Gas Journal*. 2001; (99):49—58.
102. Van Der Meer F., Van Dijk P., Van Der Werff H. et al. Remote sensing and petroleum seepage: a review and case study. *Terra Nova*. 2002; (14):1—17. doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00390.x.
103. Almeida-Filho R. Remote detection of hydrocarbon microseepage induced soil alteration. *International Journal of Remote Sensing*. 2002; (23):3523—3524. DOI: 10.1080/01431160210137712.
104. Boulart C., Connelly D. P., Mowlem M. C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels. *Trends in Analytical Chemistry*. 2010; 29(2): 186—195. doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001.
105. Salyuk P. A., Bulanov V. A., Korskov I. V. et al. Possibility of remote detection of elevated methane concentrations in sea water using optical spectroscopy methods on underwater remote-controlled vehicles. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*. 2011; 2(12):(43—51). (In Russ.).
106. Barbini R., Colao F., Fantoni R. et al. Differential lidar fluorecensor system used for phytoplankton bloom and sea water quality monitoring in Antarctica. *International Journal of Remote Sensing*. 2001; 22 (2/3): 369—384. DOI: 10.1080/014311601449989.
107. Bukin O. A., Mayor A. Yu., Pavlov V. A. et al. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar. *International Journal of Remote Sensing*. 1998; 19(4): 707—717. DOI: 10.1080/014311698215946.
108. Major A. Yu., Bukin O. A., Krikun V. A. etc. Compact ship flow fluorimeter. *Optika atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and ocean*. 2007; 20(3): 283—285. (In Russ.).
109. Carstea E. M., Baker A., Bieroza M. et al. Continuous fluorescence excitation–emission matrix monitoring of river organic matter. *Water Research*. 2010; 44(18): 5356—5366. doi:10.1016/j.watres.2010.06.036.
110. White H., Commy R., MacDonald I. et al. Methods of Oil Detection in Response to the Deepwater Horizon Oil Spill. *Oceanography*. 2016; 29(3): 76—87. doi:10.5670/oceanog.2016.72.
111. Colcomb K., Salt D., Peddar M. et al. Determination of the limiting oil viscosity for chemical dispersion at sea. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2005;(1): 53—58. doi:https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-53.
112. SMART. 2006. Special Monitoring of Applied Response Technologies Protocol Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, U.S. Environmental Protection Agency. 2006 : 43 p.
113. Proshchenko D. Yu., Golik S. S., Mayor A. Yu. et al. Development of a method of laser spark spectroscopy for geological exploration and environmental monitoring of aquatic environments in real time. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki =*

- bulletin of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2021; (1): (112—119). (In Russ.). doi:10.21685/2072-3040-2021-1-9.
114. Thornton B., Takahashi T., Sato T. Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2015; (95):20—36. doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.006.
115. Nakanishi R., Ohba H., Saeki M. et al. Highly sensitive detection of sodium in aqueous solutions using laser-induced breakdown spectroscopy with liquid sheet jets. *Optics Express.* 2021; 29 (4): 5205—5212. DOI:10.1364/OE.415308.
116. Sakka T., Takatani K., Ogata Y. H. et al. Laser ablation at the solid–liquid interface: transient absorption of continuous spectral emission by ablated aluminium atoms. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2001; 35(1): 65. DOI: 10.1088/0022-3727/35/1/312.
117. Tian Y., Hou S., Wang L. et al. CaOH Molecular Emissions in Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Spatial–Temporal Characteristics and Analytical Performances. *Analytical chemistry.* 2019; 91(21): 13970—13977. doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03513.
118. Masamura T., Thornton B., Ura T. Spectroscopy and imaging of laser-induced plasmas for chemical analysis of bulk aqueous solutions at high pressures. *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA.* 2011: 1—6. doi: 10.23919/OCEANS.2011.6107194.
119. Golik S. S., Ilyin A. A., Kolesnikov A. V. et al. The influence of laser focusing on the intensity of spectral lines in femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of liquids. *Technical Physics Letters.* 2013; 39(8): 702—704. doi:10.1134/s106378501308004x.
120. Dong B., Dengxin H., Hao Q. et al. Investigation of a Raman scattering spectral model for seawater containing a composite salt solute. *Optic Express.* 2022; 30 (5): 6713—6725. doi.org/10.1364/OE.450250.
121. Pinto R., Vilarinho R., Carvalho A. P. et al. Raman spectroscopy applied to diatoms (microalgae, Bacillariophyta): Prospective use in the environmental diagnosis of freshwater ecosystems. *Water Research.* 2021; 198: 117102. doi: 10.1016/j.watres.2021.117102.
122. White S. N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy. *Applied spectroscopy.* 2010; 64(7): 819—827. DOI: 10.1366/000370210791666354.
123. Somekawa T., Fujita M. Raman spectroscopy measurement of CH₄ gas and CH₄ dissolved in water for laser remote sensing in water. *EPJ Web of Conferences.* 2018; 176: 01021. doi:10.1051/epjconf/201817601021.
124. Pozdniakova V. V., Kustikova M. A. Raman spectroscopy for offshore hydrocarbon deposits detection. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO).* 2022: 1—1. doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840226.
125. Shiyu C., Guangming Z., Kai W. et al. Raman spectroscopic and microscopic monitoring of on-site and in-situ remediation dynamics in petroleum contaminated soil and groundwater. *Water Research.* 2023; 233: 119777. doi.org/10.1016/j.watres.2023.119777.
126. Hiraga Y., Sasagawa T., Yamamoto S. et al. A precise deconvolution method to derive methane hydrate cage occupancy ratios using Raman spectroscopy. *Chem. Eng. Sci.* 2020; 214: 115361. DOI: 10.1016/j.ces.2019.115361.
127. Tulk C. A., Ripmeester J. A., Klug D. D. The application of Raman spectroscopy to the study of gas hydrates. *Gas hydrates: challenges for the future.* 2000; 912(1): 859—872 doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06840.x.
128. Schicks J. M., Pan M., Giese R. et al. A new high-pressure cell for systematic in situ investigations of micro-scale processes in gas hydrates using confocal micro-Raman spectroscopy. *Rev Sci Instrum* 2020; 91 (11): 115103. doi.org/10.1063/5.0013138.
129. Guillaume D., Teinturier S., Dubessy J. et al. Calibration of methane analysis by Raman spectroscopy in H₂O–NaCl–CH₄ fluid inclusions. *Chemical Geology.* 2003; 194(1—3): 41—49. doi:10.1016/s0009-2541(02)00270-x.
130. Singh J., Muller A. Ambient Hydrocarbon Detection with an Ultra-Low-Loss Cavity Raman Analyzer. *Analytical Chemistry.* 2023; 95 (7): 3703—3711. DOI: 10.1021/acs.analchem.2c04707.
131. Zhevlakov A. P., Bepalov V. G., Grishkanich A. S. et al. Oil and gas deposits determination by ultraviolet spectral lidar. *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XII.* 2015; 9112: 91121F. doi.org/10.1117/12.2049920.

132. Kascheev S. V., Elizarov V. V., Grishkanich A. S. et al. Upgraded raman lidar with ultraspectral resolution. *2014 International Conference Laser Optics, St. Petersburg, Russia*. 2014: 1—1. doi: 10.1109/LO.2014.6886397.
133. Chubchenko I., Popov E., Grigorenko K. et al. Raman Gas Analyzer of Carbon Isotopologues with 50 ppm Level Sensitivity. *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. 2021: 1—1. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541690.
134. Vikin V., Polishchuk A., Chubchenko I. et al. Raman laser spectrometer: Application to $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ isotope identification in CH_4 and CO_2 greenhouse gases. *Appl. Sci.* 2020; 10(21): 7473. doi.org/10.3390/app10217473.
135. Moore C., Barnard A., Fietzek P. et al. Optical tools for ocean monitoring and research. *Ocean Science*. 2009; 5(4): 661—684. doi:10.5194/os-5-661-2009.
136. Chen S., Wang J., Zhang C. et al. Marine Structural Health Monitoring with Optical Fiber Sensors: A Review. *Sensors*. 2023; 23: 1877. doi.org/10.3390/s23041877.
137. Min R., Liu Z., Pereira L. et al. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology*. 2021; 140: 107082. doi:10.1016/j.optlas-tec.2021.107082.
138. Chakravartula V., Rakshit S., Dhanalakshmi S. et al. Linear Temperature Distribution Sensor Using FBG in Liquids—Local Heat Transfer Examination Application. *IEEE Sensors Journal*. 2021; 21 (15): 16651—16658. doi: 10.1109/JSEN.2021.3078731.
139. Wynn R. B., Huvenne V. A. I., Le Bas T. P. et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*. 2014; (352):451—468. doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012.
140. Baggio A., Turani M., Olivero M. et al. Selective distributed optical fiber sensing system based on silicone cladding optical fiber and Rayleigh backscattering reflectometry for the detection of hydrocarbon leakages. *Optics & Laser Technology*. 2023; 161: 109158. doi.org/10.2139/ssrn.4108008.
141. Arief H. A., Wiktorski T., Thomas P. J. A Survey on Distributed Fibre Optic Sensor Data Modelling Techniques and Machine Learning Algorithms for Multiphase Fluid Flow Estimation. *Sensors*. 2021; 21(8): 2801. doi.org/10.3390/s21082801.
142. Totland C., Thomas P. J., Størdal I. F. et al. A Fully Distributed Fibre Optic Sensor for the Detection of Liquid Hydrocarbons. *IEEE Sensors Journal*. 2021; 21(6): 7631—7637 doi: 10.1109/JSEN.2020.3047549.
143. Tanimola F., Hill D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2009; 1(4—5):134—143. doi: 10.1016/j.jngse.2009.08.002.
144. Ampilov Yu. P. Analysis of seismic survey errors when modeling hydrocarbon deposits and forecasting calculation parameters. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2004: 37—00024. doi.org/10.3997/2214-4609.201405518.
145. Mukhamedyarov R. D. The method of video thermal imaging generalization and its geotechnogenic significance. *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*. 2012; (1):(60—66). (In Russ.).
146. Conmy R. N., Coble P. G., Farr J. et al. Submersible Optical Sensors Exposed to Chemically Dispersed Crude Oil: Wave Tank Simulations for Improved Oil Spill Monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2014; 48(3): 1803—1810. doi:10.1021/es404206y.
147. Tsarev V. I., Bukin O. A., Golik S. S. et al. Application of the laser spark spectroscopy method in environmental studies. *Issledovano v Rossii = Researched in Russia*. 2003: 2108—2116 Available online: <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2003/174.pdf> (accessed on: 04.04.2023). (In Russ.).

Информация об авторах

Позднякова Виктория Владимировна, аспирант факультета экотехнологий Национального исследовательского университета ИТМО, viktoriya.17@mail.ru.

Кустикова Марина Александровна, кандидат технических наук, доцент факультета экотехнологий Национального исследовательского университета ИТМО, marinakustikova@mail.ru.

Information about authors

Pozdniakova Viktoriia, PhD student of the Ecotechnologies Faculty at the ITMO University, viktori-ya.17@mail.ru.

Kustikova Marina, Ph.D, associate professor, the Ecotechnologies Faculty at the ITMO University, marinakustikova@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.05.2023

Принята к печати после доработки 18.07.2023

The article was received on 15.05.2023

The article was accepted after revision on 18.07.2023