

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ МОРЕЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ТИХОГО ОКЕАНА (ПРОЕКТ «ГЕОМИР»)**

**Р. Б. Шакиров¹, В. Т. Съедин¹, А. В. Яцук¹, В. В. Саттарова¹, Н. В. Астахова¹,
О. Н. Колесник¹, М. Г. Валитов¹, Н. С. Ли¹, М. В. Шакирова², С. П. Плетнев¹,
А. Л. Пономарева¹, Е. В. Мальцева¹, Wu Nengyou³, Anh Le Duc⁴,
Dewangan Pawan⁵, Е. Э. Савельева¹**

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева,
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 41,
e-mail: ren@poi.dvo.ru;*

²*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, д. 7,
e-mail: mvovna@mail.ru;*

³*Qingdao Institute of Marine Geology, Geological Survey, Ministry of Natural Resources of China,
Fuzhou Rd, Qingdao 266071, PR China,
e-mail: wuny@ms.giec.ac.cn;*

⁴*Institute of Marine Geology and Geophysics, Vietnam Academy of Science and Technology,
Hanoi, Vietnam,
e-mail: leducanh010282@gmail.com;*

⁵*National Institute of Oceanography, CSIR,
Goa, India,
e-mail: pdewangan@nio.org*

В работе представлен краткий обзор результатов комплексных геолого-геофизических и океанографических исследований за период 2017–2023 гг., по которым выполнены межрегиональные обобщения по некоторым перспективным направлениям изучения подводных минеральных ресурсов и окружающей среды. Приведены данные по геологическим подводным объектам, в частности, марганцевым рудам Японского и Охотского морей и прилегающих акваторий; редкоземельным рудам Томторского рудного узла, древним и современным прибрежно-морским россыпям побережья моря Лаптевых; баритовым рудопроявлениям «Баритовые холмы» (в Охотском море); железомарганцевым образованиям восточно-арктического шельфа России; прибрежно-морским россыпям шельфа и побережья дальневосточных морей, в т. ч. золотоносным россыпям шельфовой зоны юга Приморья и севера Сахалина, титаномангнетитовым россыпям Курильских островов, золотоносным россыпям Северосахалинской равнины и другие. Получены прямые признаки углеводородов на участках, ранее считавшихся неперспективными (в том числе в Южно-Китайском море), закартированы и изучены скопления газогидратов в Охотском и Японском морях, подготовлены поисковые работы на газогидраты в Беринговом море, проведены сравнительные исследования гидратоносности окраинных морей СЗ части Тихого океана и Индийского океана. Исследованы основные особенности распределения литолого-газогеохимических показателей углеводородных газов в донных отложениях юго-западного сектора, наименее изученного в нефтегазоносном отношении Восточно-Сибирского моря. На основе данных газогеохимических исследований выполнена

оценка перспектив нефтегазоносности восточного шельфа Арктики. Описаны результаты геомикробиологических исследований в морях Дальневосточного региона. Отдельным огромным минеральным ресурсом в ряде случаев представляются глубоководные отложения сами по себе (пелоидоподобные осадки и др.). В настоящее время зона перехода «континент–океан» и нейтральные воды могут стать важнейшим источником восполнения минерально-сырьевой базы этих полезных компонентов. Представленные исследования соответствуют основным задачам проекта ГЕОМИР национального плана действий в рамках Десятилетия ООН наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.) и выполнены главным образом по направлениям государственного задания. Исследования газогидратов проведены в рамках рабочей группы ВЕСТПАК «Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе» (CoSGas, 2021–2024 гг.), созданной по инициативе и под лидерством России.

Ключевые слова: комплексные геолого-геофизические исследования, минеральные ресурсы, газогеохимия, геомикробиология, газогидраты, Арктика, окружающая среда, шельф России

Введение

Несмотря на богатство недр, многие виды полезных ископаемых (ПИ) в России, в связи с низким качеством минерально-сырьевой базы (МСБ), относятся к дефицитным и остродефицитным. Несмотря на высокие перспективы прироста по всем видам МСБ, в настоящее время мы вынуждены импортировать, либо изымать из резервов, уран, марганец, хром, титан, бокситы, цирконий, бериллий, литий, рений, редкоземельные элементы (РЗЭ), плавиковый шпат, полевошпат, каолин, йод, бром, оптическое сырье и др., как указано в государственной программе Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов». Часть из этих ПИ может быть эффективно восполнена за счет подводных минеральных ресурсов. Их значительные объемы в Мировом океане позволят обеспечить будущие поколения ресурсами для промышленного развития, высококачественными продуктами питания и лекарственными средствами. На преодоление этого вызова ориентированы Поручения Президента РФ по развитию минерально-сырьевой базы.

Морские научные исследования в дальневосточных морях являются важнейшим шагом к выполнению стратегии морского развития на Дальнем Востоке РФ.

С 2017 г. проводятся комплексные геолого-геофизические исследования акваторий Дальневосточного региона и прилегающих районов Тихого и Северного Ледовитого океанов коллективами ТОИ ДВО РАН, ВНИИОкеангеология, ДВГИ ДВО РАН, Дальморгео, АО «Южморгеология» и другими. В ходе этих работ были обнаружены многочисленные проявления твердых полезных ископаемых в виде железомарганцевых и кобальтоносных образований, сульфидов, сульфатов («Баритовые холмы» в Охотском море), фосфоритов (Японское море), оксидов металлов, карбонатов, фторидов, пиролюзита, рудоносных сланцев, редкоземельных элементов

(создана база данных по их содержанию в осадочных отложениях), благородных металлов в породах вулканических построек. На шельфе выделены перспективные зоны для поисков россыпных месторождений титана, ванадия и др. На участках, которые ранее считались не перспективными, обнаружены признаки углеводородов (в том числе в Южно-Китайском море), закартированы и изучены скопления газогидратов в Охотском и Японском морях, обнаружены их признаки в Беринговом море, проведены сравнительные исследования гидратоносности окраинных морей СЗ части Тихого океана и Индийского океана. Выявлены перспективы разведки проявлений «нового золота» – элементов, которые имеют большое значение в низкоуглеродных технологиях (литий, графит, кобальт, медь). Отдельным огромным минеральным ресурсом в ряде случаев представляются глубоководные отложения сами по себе (пеллоидоподобные осадки и др.). Отдельным новым перспективным направлением авторы считают материаловедение морских минеральных ресурсов: исследование полезных свойств минералов, пород и донных отложений в различных областях народного хозяйства, медицины и др.

Организации Минобрнауки и Роснедра владеют уникальными коллекциями кернов осадочных отложений, горных пород, руд и минералов из морей Восточной Арктики и западной части Тихого океана. Только в северной части Японского моря и южной части Татарского пролива получено с 2017 г. более 300 кернов и выполнена мелкомасштабная гравиметрическая и гидромагнитная съемка.

Без использования такой основы нельзя строить геологические карты нового поколения, глубоко изучать физико-химические и другие свойства подводных полезных ископаемых, выполнять мониторинг росгеолкарты и, в конечном итоге, осваивать подводную минерально-сырьевую базу.

В статье кратко приведены некоторые результаты по геологическим подводным объектам исследования, в частности это: марганцевые руды Японского и Охотского морей и прилегающих акваторий; редкоземельные руды Томторского рудного узла, древние и современные прибрежно-морские россыпи побережья моря Лаптевых; баритовое рудопроявление «Баритовые холмы» (Охотском море); железомарганцевые образования восточно-арктического шельфа России; прибрежно-морские россыпи шельфа и побережья дальневосточных морей, в том числе золотоносные россыпи шельфовой зоны юга Приморья и севера Сахалина, титаномагнетитовые россыпи Курильских островов, золотоносные россыпи Северосахалинской равнины и другие. Следует учитывать, в соответствии с вызовами Десятилетия, что одновременно с освоением подводных месторождений необходимо развивать технологии мониторинга и меры по предотвращению техногенных и природных катастроф в районах недропользования.

Целью работы является представление некоторых результатов авторов по фундаментальным исследованиям проявлений подводных ПИ в отдельных районах Мирового океана, в первую очередь в пределах исключительной экономической зоны (ИЭЗ) Российской Федерации.

Газогеохимические поля Мирового океана: фундаментальные и прикладные аспекты

Актуальность исследования газогеохимических полей углеводородных газов, гелия, водорода, углекислого газа, азота, кислорода, их соотношений и изотопных характеристик, радона, атомарной ртути и других высокоподвижных, в том числе климатически активных веществ, связана с их важной ролью в явлениях и процессах в океанологии, геологии, геофизике, экологии и биологии. Вопросы, связанные с потоками природных газов и их источниками в Мировом океане и его континентальном обрамлении: низкотемпературными сипами, гидротермами, потоками газов из угленосных толщ, грязевыми вулканами, газогидратами, рудоносными геоструктурами, находят отражение в сотнях научных трудов. Область влияния субмаринных газо- и флюидопроявлений охватывает верхнюю часть литосферы, гидросферу и нижнюю часть атмосферы Мирового океана и включает экосистемный аспект. Участки подводной дегазации занимают значительные площади дна, но недостаточно исследованы, а количество их находок увеличивается, и области распространения расширяются год от года с развитием экспедиционных исследований.

Исследования с участием авторов проведены на акваториях Тихого, Северного Ледовитого, Индийского, Южного и Атлантического океанов в период 1997–2023 гг. В работах особое внимание уделено газогеохимическим полям углеводородной специализации. Установлено, что газы и флюиды оказывают значительное влияние как на глубоководные экосистемы (включая хемосинтез), так и в целом продуктивность толщи вод (привнесение элементов). Потепление вызывает диссоциацию газогидратов вдоль континентальных окраин, при этом очевидно, что взаимосвязь климатических изменений и газовофлюидной эмиссии из океанического дна существует, но исследована незначительно. Авторы используют газогеохимические поля в качестве высокоинформативных индикаторов геологических процессов и минеральных ресурсов и применяют для геокартирования.

Нами разработаны и апробированы новые положения: газогеохимическая провинция; многоярусное строение газогидратных залежей; газогидратоносная провинция; газогидратоносный пояс; Тихоокеанское газогидратоносное кольцо; газогеохимический режим.

В ходе исследований, в период 2017–2023 гг. установлено:

1. На примере Охотоморского региона выделены 5 газогеохимических провинций, обусловленных особенностями геологического строения и процессами миграции и трансформации газовых компонентов.
2. Химический и изотопный состав аномальных газогеохимических полей и газопроявлений в условиях зоны перехода «континент–океан» определяется, главным образом, их геоструктурным положением.
3. Высока роль миграционных газов в формировании аномальных газогеохимических полей.

4. Показано, что формирование газогидратов вызвано концентрированными формами эмиссии микробных, термогенных и метаморфогенных газов, в ряде районов установлено влияние магматогенных газов и раскрыто важное значение «масс-балансного эффекта» в формировании результирующего состава гидратообразующих газов.

5. Установлена зависимость основных характеристик газогеохимических полей от сейсмотектонической обстановки. На примере морей Восточной Азии выделено 4 типа связи газогеохимических полей и газопроявлений с сейсмической активностью районов. Установленные закономерности связи характеристик газовых потоков с флуктуациями сейсмотектонических процессов важны для оценки фундаментальных вопросов рассеяния вещества и безопасности населенных прибрежных территорий. В этом аспекте особую важность имеют превентивные измерения (мониторинг).

6. Определен комплекс наиболее эффективных качественных и количественных газогеохимических критериев оценки генезиса и распределения газогеохимических полей, в том числе для целей поиска залежей углеводородов и прогноза сейсмической активности.

7. Закономерности геологического контроля газогидратоносности и распределения аномальных газогеохимических полей раскрывают взаимосвязь углеводородных скоплений различного генезиса.

Авторскими исследованиями установлено, что восходящая эмиссия природных газов обуславливает формирование аномальных полигенетических газогеохимических полей низкой, средней и высокой интенсивности (Шакиров, 2018). На акваториях геологически активных континентальных окраин и глубинных зонах дефлюидизации в открытых районах океанов на эти процессы оказывают значительное влияние литосферные нижнекоровые и верхнемантийные источники, а также сейсмотектоническая активность.

Газогидратоносные провинции окраинных морей западной части Тихого океана, отличительной особенностью которых является многоярусность, могут быть объединены в Западно-Тихоокеанский газогидратоносный пояс: прерывистую полосу скоплений газогидратов в кайнозойских отложениях с мощностью до 300 м в диапазоне глубин 350–2000 м и начальными ресурсами метана до $2-3 \times 10^{15}$ м³. В поисковых газогидратных исследованиях следует уделить внимание геологическим структурам в пределах современных палеодельт крупных речных систем. В зонах аномальных газогеохимических полей миграционных газов в осадках могут концентрироваться металлы и минералообразующие элементы (Ag, Cu, Mn, Hg, Ba, As, Fe, V, редкоземельные элементы и другие).

Результаты газогеохимических исследований вошли в отчеты совместных экспедиционных работ ФГУП «Севморгео» – ТОИ ДВО РАН по государственной программе «Внешняя Граница Континентального Шельфа ВГКШ (Охотское и Восточно-Сибирское моря, 2006–2009 гг., объекты 2-ДВ-М, 1-ОМ, 5-АР)».

Факторы, влияющие на образование подводных газогидратов западной части Тихого океана

В разделе кратко представлены результаты обобщения природных факторов, влияющих на образование подводных газогидратов. В работе анализируется процесс образования газогидратов и факторы, которые определяют устойчивость этого вещества в осадочных слоях морского дна. На основе этой схемы определены группы природных факторов для оценки перспективности разных акваторий западной части Тихого океана на наличие ресурсов подводных газогидратов. Исследования выполнены в рамках международного проекта «Геосистемы и минеральные ресурсы зон перехода «континент–океан» и открытого океана» (ГЕОМИР, ID164) Десятилетия ООН наук об океане в интересах устойчивого развития.

Быстрое развитие мировой экономики и широкое использование энергоемких технологий способствуют активному развитию очередного энергетического кризиса в мире. Необходимо изыскивать и использовать новые источники минеральной энергии, а также новые виды энергии – солнца, океана, ветра, естественной гравитации и др. Одним из перспективных источников являются природные газогидраты, 97 % которых сосредоточены в Мировом океане (Макогон, 2010; Воробьев, 2011). Газовые гидраты привлекают внимание из-за их высокой энергетической емкости, чистоты (низкий уровень выбросов углерода) и огромного количества ресурсов. Газовые гидраты становятся потенциальным топливным ресурсом и многообещающей альтернативной формой энергии на ближайшие десятилетия. Природные газогидраты – скопления гидратов, сформировавшиеся без участия человека.

На формирование и устойчивость подводных газогидратов (метастабильное твердое вещество) влияют различные природные факторы. Зная закономерности их распределения на территории, можно более точно определить возможные места скопления подводных газогидратов и перспективные площади для их поисков. Нарушение термодинамических условий в системе приводит к разложению гидратов и высвобождению метана – активного «парникового газа». Следует отметить, что высокая минерализация пластовых вод не только сдерживает, но иногда и исключает возможность реализации процесса газогидратообразования, поскольку полости каркаса решетки воды заняты молекулами соли (Якуцени, 2013).

Подавляющее большинство мест, где к настоящему времени контактными методами выявлены газогидраты, приурочены к континентальным и островным склонам и их подножиям, а также глубоководным участкам внутренних и окраинных морей, где они часто бывают связаны с подводными грязевыми вулканами или с глиняными диапирами. Многочисленными сейсмическими исследованиями все горизонты газогидратообразования обнаружены на континентальных склонах и подножиях или склонах аккумулятивных холмов. Эти горизонты являются подошвой газогидратных залежей часто мощностью от 200 до 400 м и протягиваются параллельно дну.

Главными причинами приуроченности газогидратов к континентальным склонам и подножиям являются наиболее благоприятные сочетания термобарических и геолого-геохимических условий (Kvenvolden, Ann, 1994).

Наиболее благоприятные условия для масштабного образования и накопления газогидратов имеются в хорошо проницаемых чистых тонкозернистых песках. С увеличением примесей глинистых частиц отклонения в термодинамических параметрах газогидратообразования возрастают. В тяжелых глинах чем ниже влажность (<10 % об.), тем меньше вероятность газогидратообразования, поскольку связанная пленочная вода, а также капиллярная и осмотическая вода, в этих процессах практически не участвует. Но в тех же тяжелых глинах с высокой влажностью (>80 % об.) гидратообразование происходит и при более мягких термодинамических условиях в сравнении с равновесными (Якуцени, 2013). Кроме температуры, давления и минерализации на образование и накопление гидратов существенно влияет литология пород. Для уплотненных сред с ростом дисперсности слагающих породу частиц (от крупнозернистых до мелкозернистых пород) гидратосодержание увеличивается (Козлов, Неизвестнов, 2003).

На основе совокупности этих факторов выделены группы условий распространения подводных газогидратов, которые, в свою очередь, лежат в основе определения закономерностей распределения подводных газогидратов: географические условия, морфотектонические, седиментологические, гидрографические, гидрологические, сейсмические.

Для определения акваторий восточноазиатских морей, которые могут быть перспективными газогидратоносными районами, использованы следующие факторы: рельеф дна, донные осадки, тепловой поток, глубины, сейсмоактивные зоны, результаты газогеохимических исследований. Авторами, в соответствии с максимальным сочетанием благоприятных условий и с учетом параметров районов с фактически обнаруженными газогидратами, были определены контуры акваторий (составлены карты в ГИС) с наиболее подходящими для гидратообразования районами. После наложения этих карт друг на друга и фиксирования участков, на которых все факторы совпадают, площади перечисленных выше зон сократились. Помимо зон с совпадением всех факторов, выявлены акватории, где совпало 3–4 фактора. Таким образом, получилась единая карта с наиболее перспективными в соответствии с таким подходом газогидратоносными площадями (рисунок 1).

Изучая фактические данные экспедиций, в результате которых были подняты керны с газогидратами, основные выводы авторов относительно акваторий распространения этого вещества, подтверждаются. Полученный результат явился несколько неожиданным для авторов, поскольку он существенно отличается от прогнозных карт по газогидратам, выполненным по анализу одного или двух факторов (по данным сейсмопрофилирования, термобарическим условиям и т. д.). Результаты требуют анализа и проведения международных экспедиционных исследований с целью опробования осадочных бассейнов в перспективных районах.

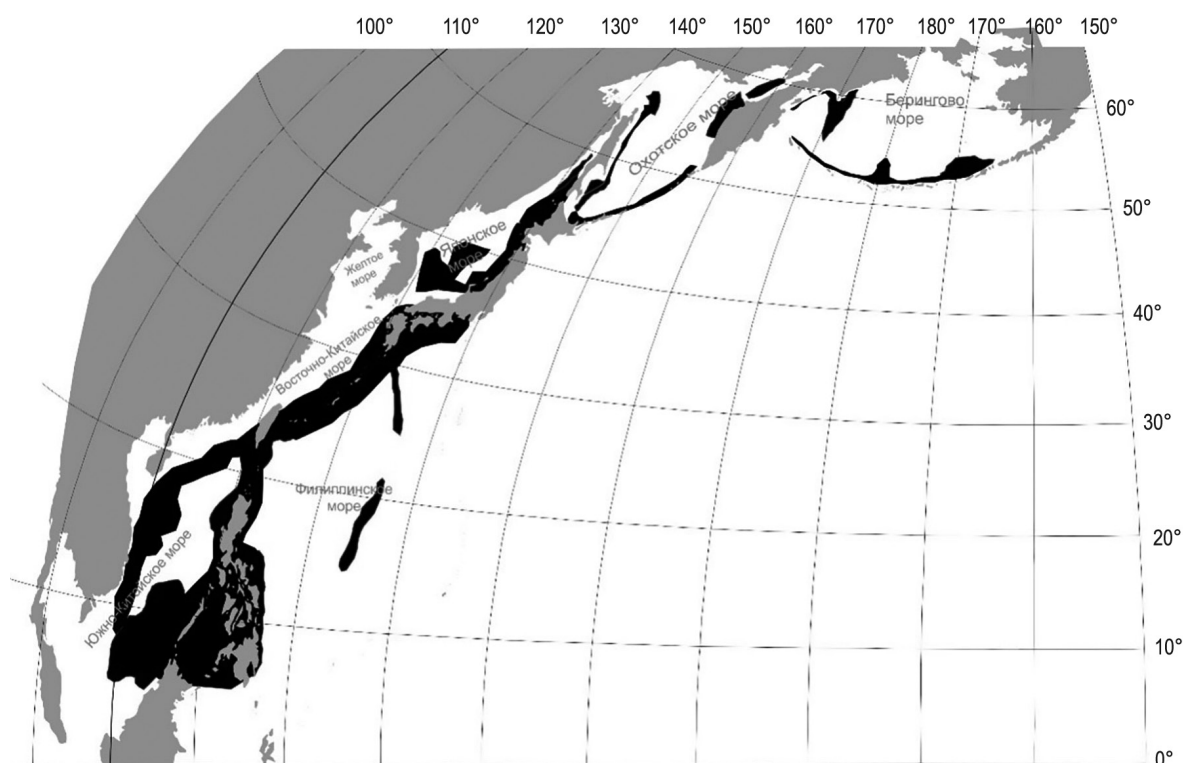


Рис. 1 – Распространение акваторий с максимальным сочетанием газогидратообразующих факторов (показано заливкой черным цветом)

Газогидраты Индийского океана

Сведения о газогидратах Индийского океана приведены в связи с расширением географии исследований рабочей группы ВЕСТПАК «Газогидраты и потоки метана» до Индо-Тихоокеанского суперрегиона.

Разведка газогидратов в Индийском океане осуществляется под эгидой Национальной программы по газогидратам (NGHP), которую выполняет консорциум нефтегазовых компаний и научно-исследовательских институтов, возглавляемых Министерством нефти и природного газа Индии. На сегодняшний день в индийских морских бассейнах проведены геофизические и геологические исследования, включая буровые работы (например, экспедиции NGHP-01 и NGHP-02). В газовых гидратах в пределах индийской исключительной экономической зоны прогнозируется ~1900 трлн м³ метана (Collet et al., 2008). Этот объем газа более, чем в 1500 раз, превышает нынешние запасы природного газа в Индии.

Программа Индии по разведке газогидратов началась в 1997 г. Индийские ученые проанализировали существующий набор геофизических, геологических, геохимических и микробиологических данных с целью оценки ресурсного потенциала газогидратов на индийском шельфе с последующей разработкой технологии безопасной добычи газа из них. Изучив более 50 000 км одноканальных сейсмических

записей, удалось обнаружить вероятные местоположения газовых гидратов на обеих окраинах Индии (Kastner et al., 1998). В 2006 г. были проведены повторные исследования. Батиметрия, температура морского дна, содержание общего органического углерода, толщина осадочных пород, скорость осаждения, геотермальный градиент вновь указали на хорошие перспективы газогидратов вдоль индийской окраины (Sain et al., 2012).

Крупные залежи газовых гидратов были обнаружены в Бенгальском заливе Индийского океана, в нефтегазоносном бассейне Кришна-Годавари. Открытие сделано в рамках программы «Газогидраты Индии» с участием ученых Индии и Японии при содействии Геологической службы США. Это скопление газогидратов приурочено к отложениям крупнозернистых песчаников, представляя преимущественно литологический тип залежи.

Бассейн Кришна-Годавари является крупным газоносным бассейном, расположенным вдоль восточного побережья Индии и включающим дельтовые и междельтовые районы рек Кришна и Годавари. Отбор кернов во время экспедиции NGHP-01 подтвердил наличие подповерхностных залежей газогидратов в бассейне, которые могут быть связаны также с глубинными источниками метана. Газогидраты распределены в виде вкраплений, заполняющих поры, в виде массивных образований в пределах разломов или в сочетании того и другого. По предварительным оценкам, общий ресурс газогидратов в разведанном районе шельфа Кришна-Годавари составляет 13.7 трлн куб. футов (Gaugav, Yadav, 2021). Лабораторные исследования указывают на наличие заполняющего поры и трещины газогидрата с насыщенностью до 80 % в более грубозернистых отложениях (в основном в песчаных слоях). Также измерения давления в керне показывают, что максимальная концентрация газогидрата составляет около 85 % на участках NGHP-02-17, -19 и -22 (Yadav et al., 2019).

В Андаманском бассейне во время экспедиции NGHP-01 был обнаружен газогидрат, распределенный в слое вулканического пепла (Collett et al., 2008). Данные бурения и каротажа также подтвердили наличие залежей гидратов слоя толщиной 30 м на глубине 1895 м. Насыщенность гидратом составила ~30 %, а начальные ресурсы составили около 1570 м³ (Shankar, Riedel, 2013).

По сравнению с другими бассейнами, в бассейне Маханади было проведено гораздо меньше работ, поскольку пробуренные скважины, керны и каротажные записи в этом бассейне показывают меньшую концентрацию газогидрата. Анализ каротажных записей скважин, измерения давления в керне и экспедиции NGHP-01 показывают, что газогидрат существует в виде рассеянной формы в мелкозернистых отложениях. Результаты геофизических исследований указывают на то, что большая площадь в бассейне богата газогидратами, но насыщенность осадочных отложений ими составляет менее 20 %. (Ojha, Ghosh, 2021). Эти исследования выполнены в рамках рабочей группы ВЕСТПАК по комплексному изучению газовых гидратов и потоков метана в Индо-Тихоокеанском регионе (CoSGas). В целом исследования в Индийском океане подтверждают необходимость многофакторного подхода к оценке ресурсов газогидратов.

Таким образом, в настоящее время необходимость исследования и картирование перспективных газогидратоносных акваторий является актуальной, особенно прямыми методами. Это залог адекватного планирования экспедиционных исследований и подготовки промышленного освоения. Такое исследование позволит не просто оценить масштабы распространения подводных газогидратов с точки зрения конкретных акваторий, но и даст возможность прогнозировать ресурсы подводных газогидратов в Мировом океане более обосновано.

О результатах изучения нефтегазоносности восточного шельфа Арктики

Необходимо отметить, что перечень стратегически важных полезных ископаемых в соответствующей государственной программе РФ начинается с нефти. За последние 5 лет выполнения морских газогеохимических исследований (Gresov et al., 2023; Shakirov et al., 2023; Гресов, Яцук, 2023) в восточно-арктических акваториях была исследована практически вся площадь слабоизученного Восточно-Сибирского моря (ВСМ) и ряд глубоководных секторов Северного Ледовитого океана. Основной целью проведения работ являлось исследование газогеохимических полей углеводородных газов (УВГ) в донных отложениях как индикаторов оценки наличия газоматеринских источников и перспектив нефтегазоносности. Собранные данные позволили построить новые площадные карты распределения газогеохимических полей метана, УВГ и других природных газов. Обнаруженные участки аномального распределения природных газов нуждаются в постановке детальных геолого-геофизических работ с привлечением современных методов комплексного изучения потенциала нефтегазоносности акваторий Арктического шельфа РФ. На основе методики газогеохимических поисков континентальных скоплений и залежей УВГ применительно к подводным отложениям ВСМ создан новый газогенетический подход, который превосходит зарубежные аналоги. Главное преимущество заключается в непосредственном определении преобладающего типа/источника УВГ (угольные залежи, магматические породы, твердый битум, конденсатно-газовые, газоконденсатные, нефтегазовые, газонефтяные, нефтяные залежи, газогидраты). Авторские газогеохимические индикаторы позволяют проводить классифицирование источников углеводородного сырья в Арктической зоне РФ. Полученные результаты, отображенные в цикле публикаций за последние 3 года (Yatsuk et al., 2021; Yatsuk et al., 2022; Gresov et al., 2023), имеют прикладной аспект, а также важны в вопросах исследования геологических источников природной эмиссии парниковых газов в акваториях Мирового океана.

В частности, исследованы основные особенности распределения литолого-газогеохимических показателей углеводородных газов в донных отложениях юго-западного сектора, наименее изученного в нефтегазоносном отношении Восточно-Сибирского моря. Выделено одиннадцать типов региональных газоматеринских источников, близких по значению с установленными аналогами в Лено-Вилуйском, Иркутском, Верхне-Буреинском, Анадырском, Сахалинском и

Охотоморском углефтегазоносных бассейнах Востока России. Оконтурыны районы с аномальной газонасыщенностью донных отложений (рисунки 2а, 2б) и распространением прогнозных нефтегазоносных площадей. На основе данных газогеохимических исследований выполнена оценка перспектив нефтегазоносности района исследований (рисунок 2в). Проведен анализ данных дистанционного зондирования распределения метана в тропосфере над Арктическим шельфом Евразии с помощью спутника AIRS за период 2010–2022 гг. (рисунок 2г) (Shakirov et al., 2023). Установлено, что распределение метана в тропосфере связано с влиянием природных сейсмогеологических факторов, а также потенциальной нефтегазоносностью региона.

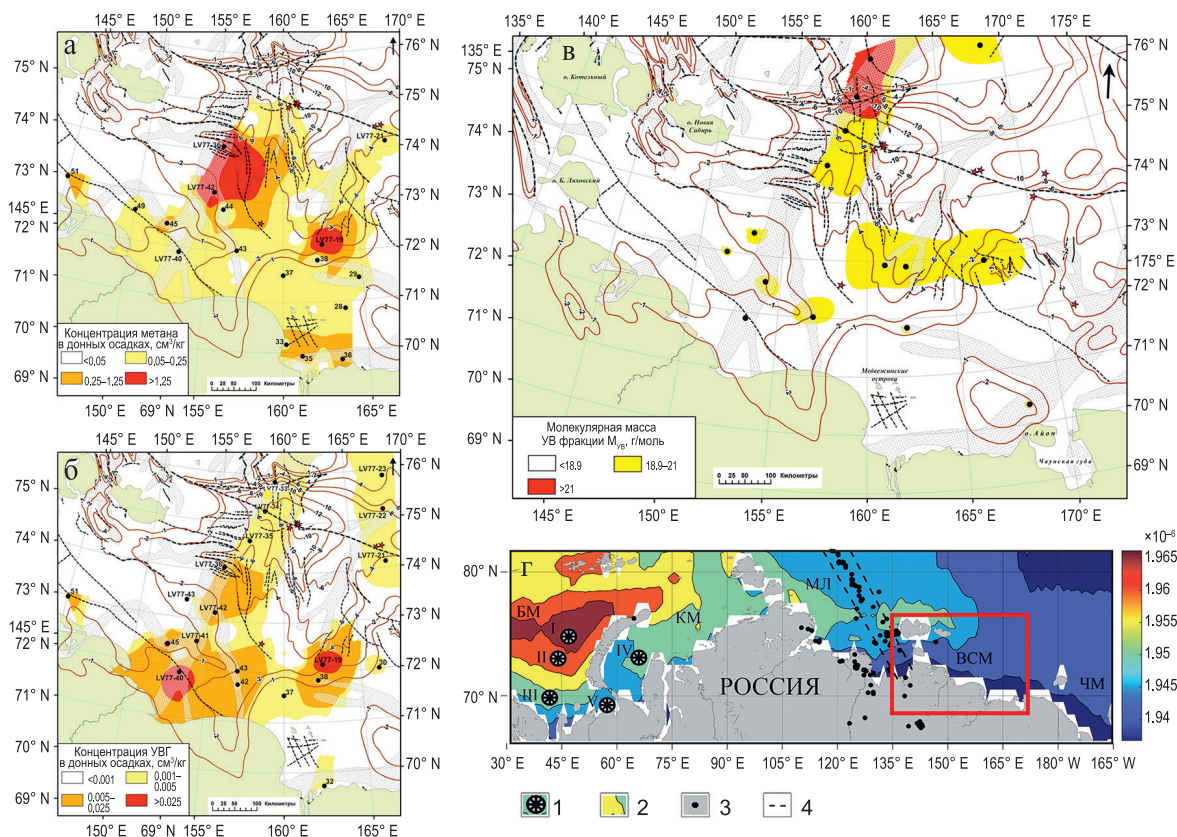


Рис. 2 – Концентрации метана (а) и углеводородных газов (б) в донных отложениях, $\text{см}^3/\text{кг}$; прогнозны нефтегазоносные площади (в); анализ данных дистанционного зондирования распределения метана в тропосфере (г)

Комплексные геолого-геофизические исследования в Японском море (2017–2022 гг.)

Район северного замыкания Центральной котловины, где в основном были сосредоточены исследования, является одним из ключевых объектов, изучение которого поможет пролить свет на такие глобальные вопросы, как история происхождения и развития Японского моря, его геологическое взаимодействие с континентальной

окраиной, этапы магматизма, осадконакопления, тектоники и климатических изменений. Не менее актуальные ответы могут быть получены на вопросы о переносе вещества в океане, о формировании и разрушении залежей полезных ископаемых и углеводородов. До 2017 г. этот объект не был подвергнут комплексному, планомерному изучению, здесь лишь были выполнены профильные, либо попутные геофизические съемки, отобраны образцы горных пород с некоторых возвышенностей и взято несколько проб пластичного осадка с абиссали.

В связи с этим, целью работ было выполнение комплексных геолого-геофизических, газогеохимических и океанографических экспедиционных исследований для решения проблемы условий и механизмов формирования Японского моря, Татарского пролива и изучения корреляции распространения газо-флюидных потоков с сетью тектонических разломов в одном из сейсмоопасных районов о-ва Сахалин.

Начиная с 2017 г., ТОИ ДВО РАН проводит комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанологические исследования в ключевых районах российских окраинных морей Тихого океана. Работы были выполнены на научно-исследовательских судах НацОНИФ Минобрнауки РФ. В работе представлены результаты комплексного изучения зоны сочленения мегаобъекта – Татарского пролива с северным замыканием Центральной котловины Японского моря.

Материалы и методы

При поддержке Федерального агентства научных организаций РФ (с 2018 г. преобразовано в Министерство науки и высшего образования) в Японское море (Татарский пролив) авторами было организовано 6 экспедиций на научно-исследовательских судах НацОНИФ: «Академик Опарин» (рейс № 54 (2017 г.), № 55 (2018 г.), № 61 (2020 г.)), «Академик А. М. Лаврентьев» (рейсы № 81 (2018 г.), № 85 (2019 г.)) и «Профессор Гагаринский» (рейс № 79 (2022 г.)). В результате исследований была покрыта площадь 177 158 км² (рисунок 3).

В процессе работы проводились батиметрическая и геофизические съемки (гидроакустическое зондирование, гравиметрические и магнитометрические измерения, непрерывное сейсмопрофилирование), гидрофизические и атмосферические измерения; на станциях производился: отбор проб осадков и воды, литологическое описание осадков, извлечение газа из проб керна донных осадков, колонок воды, набортный газохроматографический анализ и микробиологические исследования. Получен большой объем новых данных, анализ и интерпретация которых позволят более детально понять глубинную структуру, характер тектонических деформаций консолидированного фундамента в пределах Сихотэ-Алинского шельфа на севере Японского моря и природу газоактивности южной части Татарского трога.

За время экспедиций выполнена площадная съемка 1:1 000 000 масштаба комплексом геофизических методов, включающих магнитно-градиентометрические, гравиметрические измерения и работы методом НСП для изучения геологической структуры, зон разломов исследуемого района с потоками газа из донных отложений в воду

и частично из воды в атмосферу. Всего за время экспедиции пройдено 23 809 миль. Выполнено более 21 382 погонных миль эхолотного промера, 16 474 миль гравиметрической съемки, 16 374 миль магнитометрической съемки и 1856 миль сейсмопрофилеирования. Также в течение всего рейса проводились профильные наблюдения приводного слоя атмосферного воздуха (определение содержаний ртути, парниковых газов и гидрометеорологические измерения).

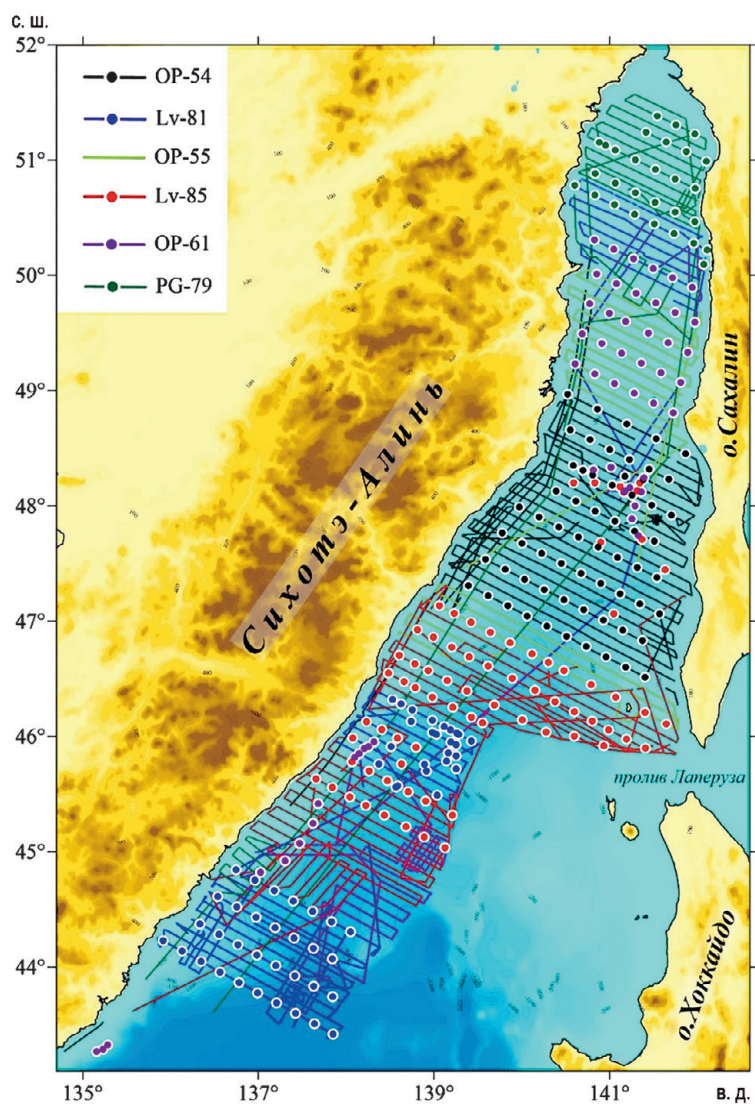


Рис. 3 – Карта-схема изученности Татарского пролива (Японское море) (2017–2022 гг.) с расположением профилей геофизической съемки и комплексных станций отбора проб

В экспедициях был выполнен большой объем геолого-газогеохимического и микробиологического опробования пластичного осадка. Всего было выполнено 290 станций отбора донных отложений до глубины 400 см ниже поверхности дна, сделано на борту 7556 газохроматографических определений газов осадков, создана рейсовая коллекция кернов осадка общей длиной 586.52 м, проведен набортный анализ осадков методами рентгенофлуоресцентной спектрометрии, микроскопии,

каппометрии и др. На всех геологических станциях были отобраны образцы осадка для микробиологических и литодинамических исследований.

Выполнены высокоразрешающие измерения распределения метана, углекислого газа, паров воды, аммиака, оксида азота и ртути в приводном слое атмосферы в районе работ, намечена корреляция атмосферных аномалий метана и углекислого газа с активизированными по газовой миграции участками морского дна.

Результаты исследований

Анализ распределения геофизических полей и батиметрии указывает на сложное глубинное строение зоны сочленения южной части Татарского пролива с Центральной глубоководной котловиной Японского моря. Здесь, на относительно небольшой площади, происходит резкое изменение морфологического облика дна: от абиссальной равнины глубоководной котловины до шельфа. Меняется также и глубинное строение региона: от базитовой океанической коры котловины до сиалической континентальной коры материка. Многочисленные разрывные нарушения находят свое отражение в геофизических полях. Отдельные разрывные нарушения трассируются с материка, в том числе региональные разломные зоны, выделяемые на сопредельных территориях Китая и Японии.

Впервые установлены аномалии углеводородных газов (газогидратного и нефтегазового типов), выделены в коллекцию нефтеокисляющие, метанотрофные микроорганизмы в двух районах до глубин 2000 м: северном замыкании центральной котловины Японского моря и южном окончании Татарского трога. Обнаруженные абиссальные бактериальные сообщества за короткое время в условиях судовой лаборатории оказались способны переработать природную нефть.

Впервые в районе исследований выявлены многочисленные субвертикальные зоны газонасыщенных осадков (chimney), а также другие сейсмоакустические аномалии в осадочной толще южной части Татарского трога. Уточнен газогеохимический фон, закартированы новые аномальные газогеохимические поля, на этой основе намечены новые глубоководные зоны нефтегазогенерации и скоплений газогидратов.

Получены новые уникальные данные, касающиеся комплексных лито-геохимических характеристик осадочных отложений района исследований. Обнаружены аномально высокие концентрации некоторых элементов в кернах глубоководных осадков (марганец, железо, стронций и др.). Некоторые керны глубоководных осадков были необычно интенсивно слоистыми, отобран материал для анализа ледового разноса, обнаружены свидетельства молодых оползней, прослой тефры и другие важные особенности.

Коллекция проб осадочных отложений по всем станциям перемещена в береговые лаборатории для детальных исследований. В ходе одной станции драгирования подняты необычные корки в районе возвышенности Алпатова.

Накоплен большой объем материала, который может быть использован для проведения метагеномных исследований. Созданы коллекции накопительных и чистых

культур микроорганизмов для исследования процессов газоокисления, нефтеокисления и газогенерации в осадочных отложениях и верхнем стометровом слое воды. Обнаружена редкая карбонатная молодая аутигенная минерализация (икаит) на континентальном склоне (Сихотэ-Алинь) в районе исследования.

Одновременно с изучением геологического строения государственного шельфа авторы проводят фундаментальные и поисковые исследования твердых полезных ископаемых в дальневосточных морях и морях Восточной Арктики. Ниже приводятся некоторые результаты таких исследований.

Железомарганцевые руды Японского и Охотского морей (ИЭЗ России)

Потребности металлургической и химической промышленности РФ в марганце в настоящее время удовлетворяются в основном за счет импорта марганцевых руд: марганец является остродефицитным сырьем в России. В связи с этим существуют высокие перспективы использования марганцевых образований окраинных морей, в том числе в пределах ИЭЗ России. В Японском море, в экономической зоне России, выявлены 10 районов формирования железомарганцевых отложений, приуроченных к вулканическим постройкам (рисунок 4). Рудные корки в разных местах отличаются по мощности, внутреннему строению и химическому составу.

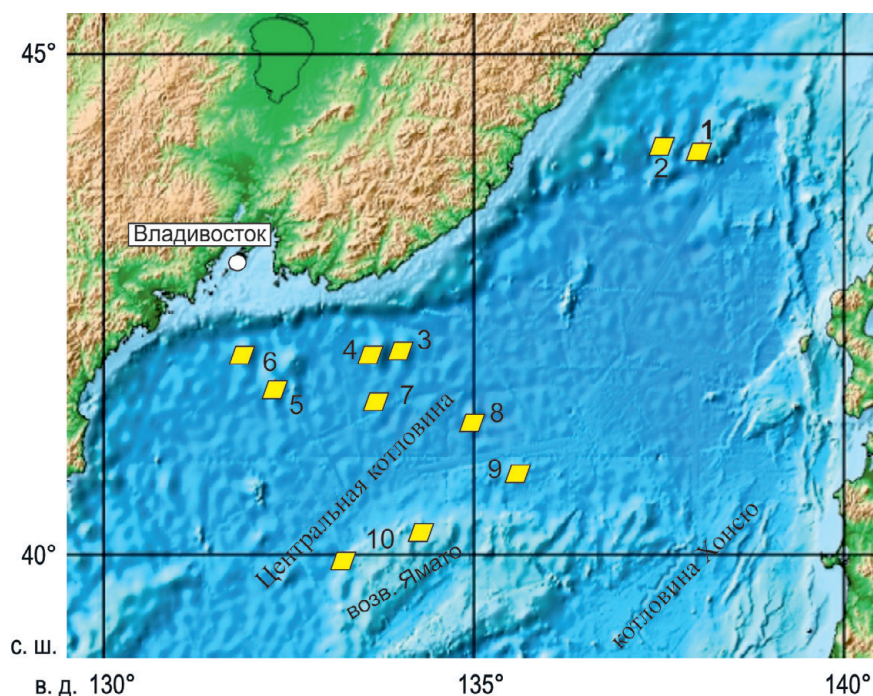


Рис. 4 – Местоположение районов развития железомарганцевой минерализации в Японском море (экономическая зона России). Значками показаны возвышенности: 1 – Витязя, 2 – безымянная, 3 – Васильковского, 4 – Берсенева, 5 – Первенец (Сибирь), 6 – Петра Великого, 7 – безымянная, 8 – Беляевского, 9 – Шевалдина, 10 – Северное Ямато (Астахова, Лопатников, 2017)

Они подразделяются на железистые, железомарганцевые и марганцевые разновидности (Астахова, 2018). На сегодняшний день выделены наиболее перспективные районы для детальных работ по изучению марганцевого оруденения. В таких районах содержание марганца в корках достигает 63 %, что в два–три раза выше, чем на гайотах центральной части Тихого океана (Астахова, Лопатников, 2016). В отличие от океанических аналогов, железомарганцевые образования Японского моря залегают на значительно меньшей глубине, вблизи крупных портовых городов и вероятных источников сбоята. Добыча таких руд регламентируется только российскими законами, что позволяет рассматривать их как потенциальный независимый источник марганцевого сырья, а возможно, и других металлов (Астахова, Астахов, 2003). В Охотском море железомарганцевые образования (ЖМО) изучены значительно слабее, чем в Японском море (Астахова, Саттарова, 2005; Батулин, 2012). Они в основном приурочены к вулканическим постройкам Курильской котловины (обнаружены на 33 из 126 вулканических постройках). В Охотском море железомарганцевые отложения обычно маломощные, чаще всего не превышающие 1–3 см в толщину и содержат почти одинаковое количество железа и марганца (Астахова, Саттарова, 2005). Представляют интерес только для изучения процессов рудообразования на морском дне и, как и в Японском море, могут служить поисковым признаком более высокотемпературных полиметаллических отложений.

Железомарганцевые образования восточно-арктического шельфа России

ЖМО – один из основных видов минеральных образований арктического шельфа (рисунок 5).

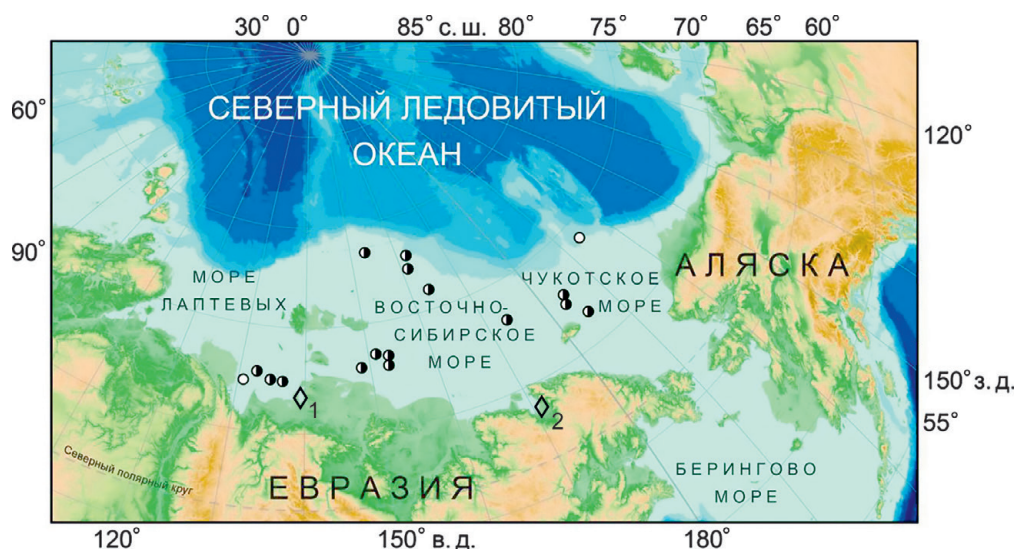


Рис. 5 – Распространенность железомарганцевых корок и конкреций на шельфе восточно-арктических морей РФ (Колесник и др., 2021, 2023; Колесник, Колесник, 2013).

Ромбами показаны наиболее известные прибрежно-морские россыпи касситерита:
1 – Чокурдахская, 2 – Валькумейская

Их отличает высокая скорость формирования и молодой, чаще всего голоценовый, возраст. Быстрый рост обусловлен близостью источников сноса и происходит главным образом за счет мобилизации из осадочной толщи восстановленных форм железа и марганца с последующей их фиксацией в поверхностном окисленном слое осадков в виде оксигидроксидов. Рудное вещество в составе ЖМО сложено преимущественно лимонитом. В относительно глубоководных, удаленных от континентальной суши, районах в ЖМО кроме лимонита появляется вернадит. ЖМО обогащены относительно осадков железом, фосфором, мышьяком, молибденом и, как правило, марганцем. Превышение содержания в отдельных образцах может достигать сотен раз. Наиболее обогащенными среди ЖМО морей Восточной Арктики являются ЖМО Чукотского моря, но даже они промышленного значения не представляют.

Баритовое рудопроявление «Баритовые холмы» в Охотском море

Баритовое рудопроявление «Баритовые холмы» выявлено в восточной части впадины Дерюгина на глубинах моря 1450–1600 м (рисунок 6) и изучалось в ряде экспедиций (Астахова и др., 1987, 1990; Astakhova, 1993; Деркачев и др., 2000; Саломатин, Юсупов, 2009; Астахов и др., 2017).

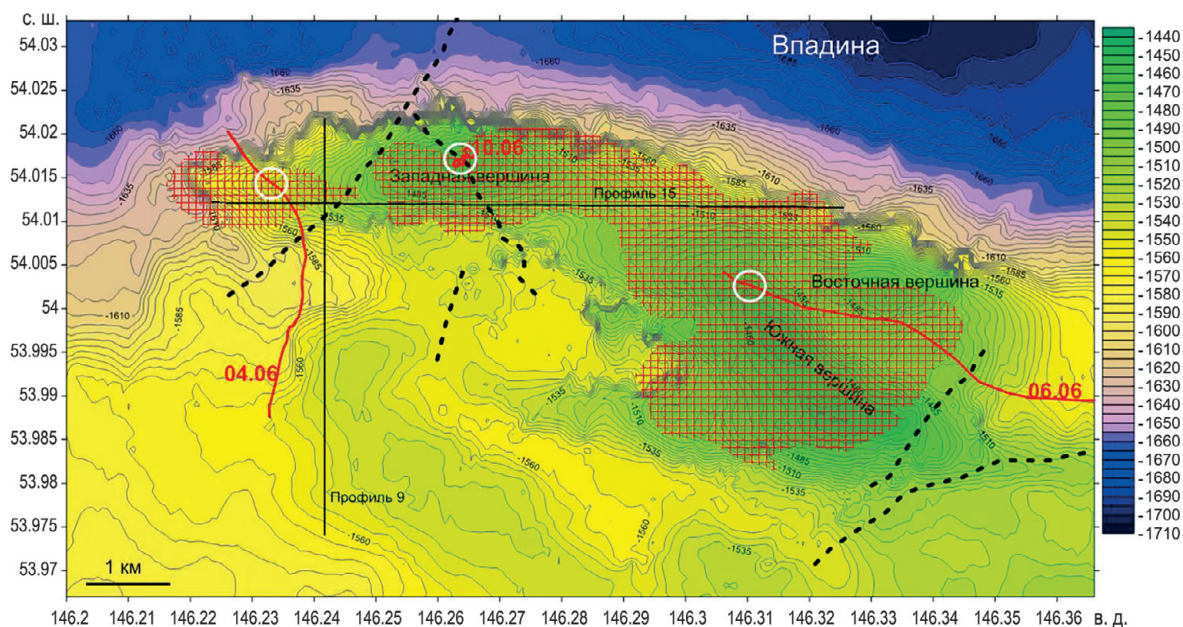


Рис. 6 – Рельеф дна района «Баритовых холмов», распространение баритовых построек и маршруты погружений ТПА Comanche и OFOS (Aloisi et al., 2004; Саломатин, Юсупов, 2009; Астахов и др., 2017). Красной штриховкой показана основная область распространения высоких (более 2 м) баритовых построек; красными линиями – маршруты погружений ТПА Comanche; синими штриховыми и сплошной линиями – маршруты погружений системы OFOS; белыми кружками – участки, где обнаружены формирующиеся баритовые постройки

Общепризнано, что формирование его связано с поступлением с глубины несколько километров гидротермальных барийнесущих растворов. Они формируют при контакте с сульфатом морской воды трубообразные постройки травертиноподобного барита высотой до 12 м, а при проникновении в донные осадки – многообразные по форме конкреции, трубки, базальный цемент (Астахова и др., 1987, 1990; Astakhova, 1993; Деркачев и др., 2000). Баритовые постройки, в той или иной степени разрушенные, покрывают всю поверхность в пределах выделенных участков. Для оценки масштабов оруденения и, соответственно, перспектив практического использования рудопоявления необходимо оценить запасы и формы нахождения барита в толще осадка, для чего требуется бурение на глубину до 100 м. Перспективы рудопоявления могут увеличиться при обосновании возможности восстановления запасов после отработки, в пользу чего свидетельствует наличие молодых построек, формирующихся в настоящее время в осевой части поднятия Баритовые холмы.

Редкоземельные минералы Томторского рудного узла и донных отложений моря Лаптевых

Томторский рудный узел связан с крупнейшим в мире Томторским массивом щелочных карбонатитовых пород, генетически тяготеющим к Анабарскому шиту (Владыкин, Торбеева 2005). Одноименное уникальное месторождение ниобий-редкоземельных руд сформировано в палеозойской пироклор-монацитовый коре выветривания карбонатитов, хотя рудные концентрации приурочены также к малоизмененным лампроитам и перекрывающим разновозрастным отложениям. Известны прибрежно-морские монацитовые россыпи в мезо-кайнозойских отложениях, находящиеся на суше (Толстов и др., 2011) и в современных пляжевых отложениях моря Лаптевых (Патык-Кара, 2008). Основным рудным минералом в них является монацит, имеющий преобладающие размеры около 50 микрон (Лазарева и др., 2017; Добрецов и др., 2021).

По результатам изучения редкоземельных элементов (РЗЭ) в восточно-арктических морях РФ установлено существенное обогащение донных осадков моря Лаптевых за счет поступления рудных минералов с выносами рек и при береговой эрозии ледового комплекса (едома) на побережье (рисунок 7) (Астахов и др., 2018; Astakhov et al., 2019; Sattarova et al., 2023). Основным рудным минералом РЗЭ в осадках является монацит (Sattarova et al., 2023), концентрирующийся во фракции 32–63 микрон. Установлено преобладание легких РЗЭ (La, Ce), что также соответствует спектрам лантаноидов в рудах месторождения Томтор (Владыкин, Торбеева 2005; Лазарева и др., 2017). Таким образом, учитывая необходимость освоения в недалеком будущем месторождений Томторского рудного узла (Толстов и др., 2014; Добрецов и др., 2021), предлагается первоочередное изучение и начало освоения современных и древних прибрежно-морских россыпей РЗЭ вблизи побережья моря Лаптевых. Это согласуется с государственной стратегией развития зоны Северного морского пути

с использованием, в том числе, плавучих атомных электростанций. Созданные при этом технологии, инфраструктура и техническая база на побережье могут быть использованы для последующего обеспечения освоения коренных месторождений Томторского рудного узла.

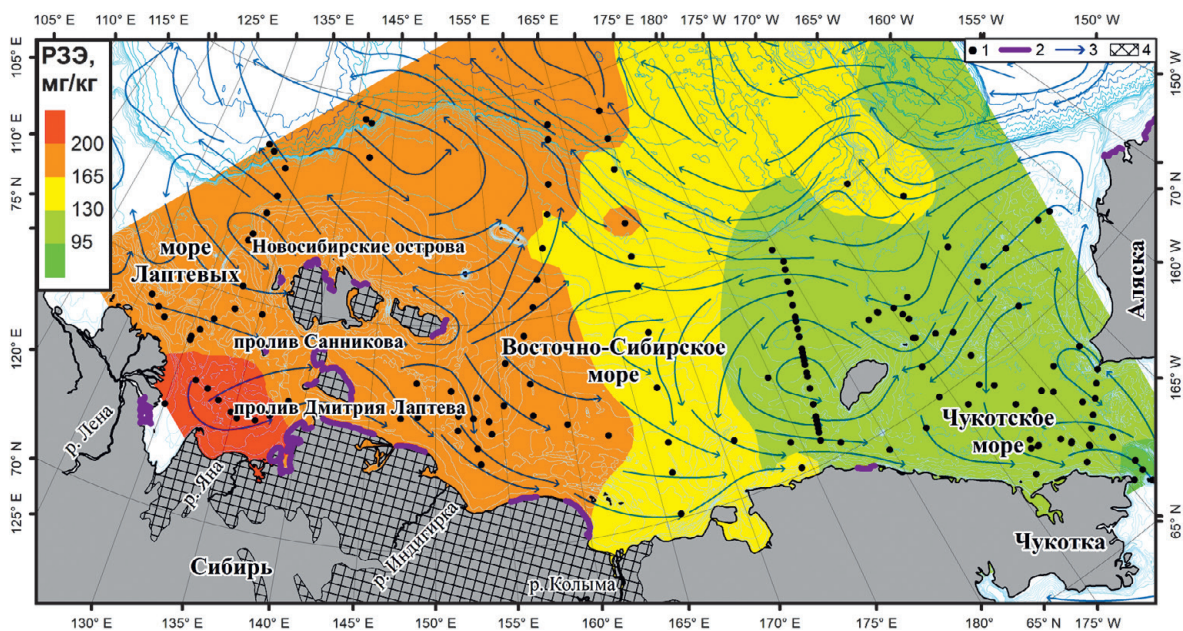


Рис. 7 – Распределение редкоземельных элементов в донных отложениях восточно-арктического шельфа России (Astakhov et al., 2019, Sattarova et al., 2023):
1 – местоположение станций; 2 – активно эродированные участки побережья (> 0.5 м/год); 3 – направление поверхностных течений (Fagel et al., 2014);
4 – прибрежные районы с отложениями ледового комплекса (Едома)

Прибрежно-морские россыпи шельфа и побережья

На шельфе и примыкающем побережье дальневосточных морей в 60-х–90-х годах прошлого столетия достаточно интенсивно велись поиски россыпных залежей титаномагнетита, золота, олова, редкоземельных элементов и, реже – платиноидов (Валпетер и др., 1984). Небольшие рудопроявления их были выявлены в Южном Приморье, Западном Приохотье, заливе Шелихова, на шельфе Западной Камчатки, Курильских островов и восточно-арктических морей (Коган, 1974; Крапивнер, 1975). Некоторые из изученных объектов были отнесены к месторождениям, остальные к рудопроявлениям, но из-за малых запасов или не востребоваемости далее не изучались. Среди россыпных проявлений рудных минералов на шельфе и примыкающем побережье наибольшие перспективы для дальнейшего освоения имеют титаномагнетитовые (ильменит, титаномагнетит, магнетит) пески побережья Курильских островов и Восточной Камчатки. Они приурочены к пляжам, береговым террасам и дюнам. Небольшая часть их выделена в месторождения, остальные отнесены к рудопроявлениям.

С ростом потребностей в титаносодержащем сырье, а также переходом части сырьевой базы в ближнее зарубежье (Украина, Казахстан), возникла необходимость разведки и исследования новых месторождений России с целью выяснения возможностей ввода их в эксплуатацию в самое ближайшее время. Титаномагнетит, вполне устойчивый в условиях физического выветривания и вдвое более тяжелый, чем порообразующие минералы, накапливается в россыпях, образуя мощные пластовые концентрации шириной в сотни и тысячи метров и протяженностью в десятки километров. Они приурочены к пляжам, береговым террасам и дюнам. Химический состав россыпных титаномагнетитов разнообразен. В большинстве случаев в них содержится от 7 до 11 мас. % TiO_2 . В среднем они содержат Cr от 50 до 300 г/т, Mn – 3400–4800 г/т, V – 2200–3500 г/т, Co – 120–210 г/т, Ni – 23–60 г/т, Zr – 57–100 г/т, Zn – 480–910 г/т, Cu – 23–65 г/т, Sn – 14–50 г/т (Мелкий, 1995). Предполагается с помощью современных аналитических методов изучение концентраций редких, рассеянных и редкоземельных элементов в титаномагнетитах из россыпей, связанных с разнофациальными вулканическими и вулканогенно-осадочными комплексами Курильских островов.

На двух месторождениях: Ручарском (о. Итуруп) и Халактырском (Восточная Камчатка) проведена детальная разведка с подсчетом запасов категорий А и Б, на остальных выполнены поисково-разведочные и поисковые работы. Ресурсы титаномагнетита из россыпей в России в XX веке не были востребованы. Это минеральное сырье нового времени. Освоение его будет иметь геополитическое значение, способствует кардинальным изменениям рынка и рыночного пространства Ti и V, созданию сети местных источников металлургического сырья, сокращению издержек на транспортировку минерального сырья и металлопродукции. Инвестиционные проекты по освоению Восточной титан-ванадиевой провинции по технико-экономическим показателям и социальным последствиям для Дальнего Востока могут оказаться в числе наиболее привлекательных (Мелкий, 2010; Мелкий, Верхотуров, 2019). Имеются предварительные оценки экономической эффективности освоения некоторых месторождений. Эти месторождения в случае изменения конъюнктуры рынка могут быть освоены для получения титана и двуокиси титана, пятиокиси ванадия, а также магнетита, как добавки при металлургическом процессе.

Золотоносные россыпи шельфовой зоны юга Приморья

Аскольдовское месторождение

По результатам ранее проведенных работ Аскольдовское золоторудное месторождение оценивается как объект с ожидаемыми относительно несложными горнотехническими и гидрогеологическими условиями отработки. По состоянию на 01.01.2010 г. по делювиально-техногенной россыпи о. Аскольд на государственном балансе числятся балансовые запасы категории С1: песков – 768 тыс. м³, золота – 250 кг,

при среднем содержании золота 0.32 г/м^3 (ЦКЗ, протокол № 11, 1979 г.). Экономической оценки отработки делювиально-техногенной россыпи не проводилось, так как россыпь и коренное месторождение необходимо рассматривать в едином плане. Главные минералы руд: золото, кварц, пирит. Второстепенные: сфалерит, галенит, халькопирит, блеклая руда, пирротин, мусковит, рутил. Редкие: висмутин, станнин, айкинит, калаверит, кюстелит. Ранее подсчитанные суммарные запасы и ресурсы золота в коренном залегании составляют: руды – 1369.8 тыс. т, золота – 8972.9 кг со средним содержанием 6.55 г/т.

При изучении золотоносности шельфа Приморья неоднократно ставился вопрос о необходимости оценки и способах извлечения тонкого золота, концентрации которого (до $200\text{--}500 \text{ мг/м}^3$) встречаются по всему разрезу четвертичного осадочного чехла. Часть этого золота присутствует в неизвлекаемых формах – в сорбированном виде с глинистыми и фосфоритовыми конкрециями, в виде металлоорганических соединений. Из реальных перспектив ближайшего будущего в рассматриваемом регионе могут представлять интерес только небольшие близповерхностные и неглубокозалегающие части подводных россыпей при условии утилизации их нерудной составляющей. Однако приходится учитывать, что в случае полной выемки золотоносных осадков в пляжевой зоне и на подводном склоне будет нарушаться баланс наносов, что может привести к размыву берегов.

Некоторые результаты работ на Магеллановых горах, СЗ часть Тихого океана

Особое значение имеет развитие научных исследований на участках контрактов РФ по разведке глубоководных полезных ископаемых в Тихом и Атлантическом океанах. В этой связи приведем результат авторов (Съедин и др., 2023) по научным исследованиям на участке Магеллановых гор, который расположен в южной части северо-западного сектора Тихого океана между Марианскими и Маршалловыми островами (рисунок 8). Это наиболее древняя и сложная по своему геологическому строению часть Тихого океана (Плетнев и др., 2020; Пушаровский, 2005 и др.). Магеллановы горы – это один из наиболее изученных объектов Мирового океана в геолого-геофизическом отношении. Они сложены разновозрастными магматическими и осадочными породами. В марте 2015 г. Международный орган по морскому дну при ООН (МОМД ООН) закрепил за нашей страной 4 гайота (Говорова, Вулканолог, Альба и Коцебу) для проведения на них поисково-разведочных работ. Этот факт имеет большое значение для изучения гайотов Магеллановых гор.

Авторами выделены возрастные вулканические комплексы и тектономагматические этапы эволюции гайотов Магеллановых гор на основании анализа данных по радиоизотопному датированию вулканитов этих структур. Полученные данные, а также анализ доступных геолого-геофизических материалов по изучению

этих структур и прилегающей части Тихого океана, позволили сделать следующие выводы:

1. Вулканическая активность на гайотах Магеллановых гор имела длительный и пульсирующий характер. Активный магматизм на гайотах, вероятно, начался в позднеюрское время и затем периодически проявлялся здесь до конца миоцена. Не исключено, что его отдельные эпизоды были и в плиоцен-плейстоценовое время.

2. Впервые на основе имеющихся определений изотопного возраста (122 датировки), биостратиграфических данных, а также материалов глубоководного бурения на гайотах Магеллановых гор, выделены 5 крупных тектономагматических этапов: 1 – позднеюрско-раннемеловой (самый ранний мел – ~160–140 (?) млн лет); 2 – раннемеловой (поздний баррем (?)-апт-альбский – ~127–96 млн лет); 3 – позднемеловой (позднесеноман (?)-турон-раннекампанский – ~95–76 млн лет); 4 – позднемеловой (позднекампан-маастрихский ~74.5–66.0 млн лет); 5 – кайнозойский (~66–0 млн лет). Крупный кайнозойский этап разделяется на три этапа более низкого порядка: 1 – позднепалеоцен-эоценовый, 2 – позднеолигоцен-раннемиоценовый, 3 – среднемиоцен-позднемиоценовый (плиоцен-плейстоценовый?). Каждый из них соответствует определенному возрастному комплексу вулканитов Магеллановых гор.

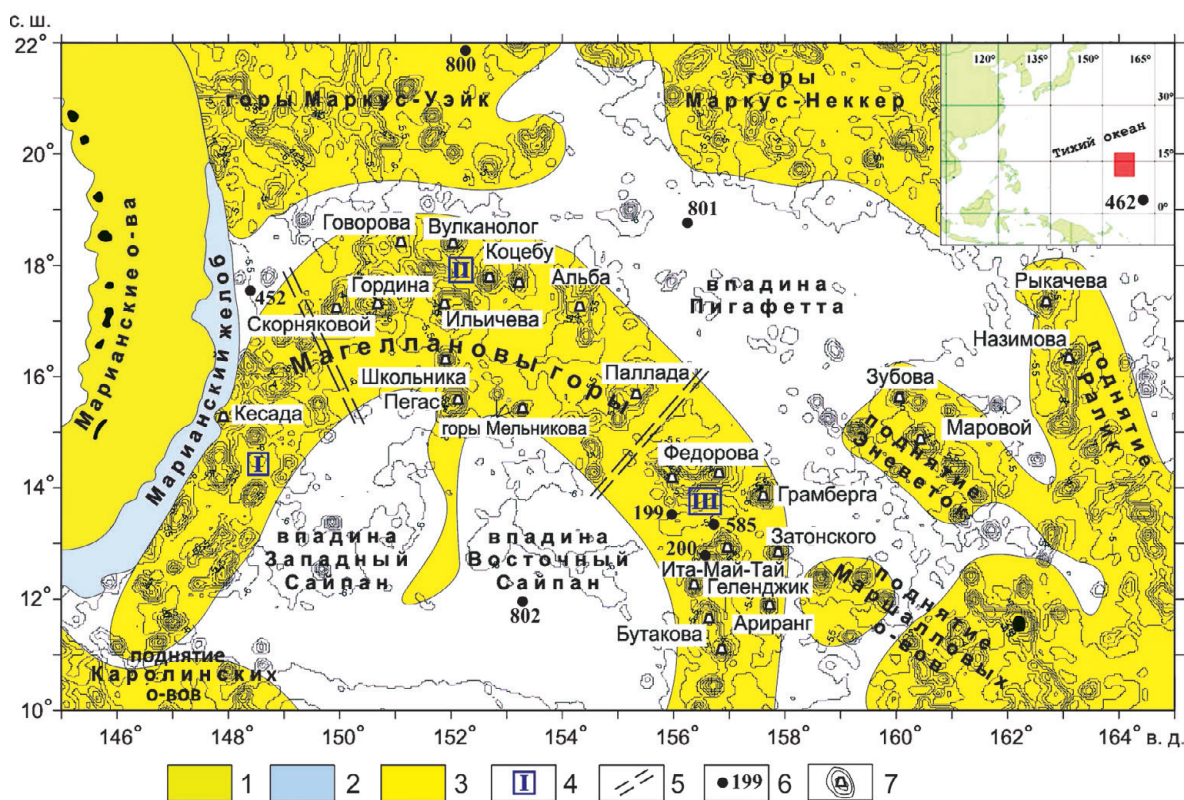


Рис. 8 – Рельеф Магеллановых гор и сопредельных структур (по Съедин и др., 2023): 1 – поднятие Марианской островной дуги; 2 – Марианский желоб; 3 – внутриплитные океанические поднятия; 4 – звенья Магеллановых гор: I – Западное звено, II – Северное звено, III – Восточное звено; 5 – границы между звеньями Магеллановых гор; 6 – скважины глубоководного бурения DSDP и ODP и их номер; 7 – изобаты (в километрах) и центры гайотов. На врезке красный прямоугольник – положение Магеллановых гор в Тихом океане; положение скв. 462.

3. Каждый из тектономагматических этапов характеризует конкретное геоморфологическое пространство гайотов Магеллановых гор: 1-й (позднеюрско-раннемеловой) – основание или пьедестал гайотов; 2-й (раннемеловой – апт-альбский) и 3-й (позднемеловой – позднесеноман(?)-турон-раннекампанский) – основная часть постройки гайотов; а 4-й (позднемеловой – позднекампан-маастрихский) и 5-ый (кайнозойский) – небольшие осложняющие наложенные структуры 2-го порядка.

4. Тектоно-магматические этапы гайотов Магеллановых гор имеют различную продолжительность, и каждый из них, естественно, внес разный вклад в формирование общего тела гайотов Магеллановых гор. Наиболее длительными были 1-й и 5-й этапы, длительность которых составляет порядка 40–60 млн лет.

5. Хронология тектономагматических этапов гайотов Магеллановых гор хорошо согласуется с этапами тектономагматической активизации, как для всего Тихого океана, так и его отдельных структур. Факт хорошего согласования по времени проявления тектономагматических этапов эволюции гайотов Магеллановых гор и других структур Тихого океана свидетельствует о существовании единых этапов проявления магматизма в различных районах Тихого океана.

6. Продолжительная вулканическая деятельность и, прежде всего, поствулканические процессы сыграли определяющую роль в поставке в океанскую воду флюидов, обогащенных рудными компонентами. Это в результате различных процессов могло привести к формированию различных типов ЖМО на гайотах Магеллановых гор. Периодичность (дискретность) вулканических процессов в течение длительного периода времени обеспечила и известную стадийность в образовании Fe-Mn корок.

Таким образом, изучение вулканических пород и данные по их радиоизотопному датированию свидетельствуют о длительных процессах магматизма на гайотах Магеллановых гор и его определяющей роли в формировании и эволюции этих структур. Высокий уровень исследований и кондиционные материалы, полученные при изучении вулканических и осадочных пород, а также ЖМО гайотов Магеллановых гор позволяет рассматривать их в качестве эталонного объекта при изучении особенностей эволюции структур подобного типа в Тихом океане.

Геомикробиологические системы Мирового океана и их индикаторные аспекты

Геомикробиология описывает микроорганизмы и процессы, которые существуют на стыке био- и геосферы. Изучение таксономического разнообразия, функциональных свойств микробиальных систем позволяет не только описать процессы, протекающие в морских донных отложениях, но и проводить индикацию нефтегазовых и других залежей.

Микроорганизмы являются ведущими участниками биогеохимических циклов Мирового океана и играют ведущую роль в формировании среды и взаимодействии био- и геосфер. К наиболее важным геомикробиологическим процессам относятся

некоторые этапы седиментации, диагенеза и фиксации углерода и азота. Их таксономическое разнообразие и физиологические свойства могут быть использованы в качестве биоиндикаторных признаков нефтегазовых структур, как непосредственно их обнаружения, так и характеристик, например, типа залежи. При обнаружении пульсирующих газовых сипов геомикробиологические индикаторы приобретают особую значимость, так как обнаруживаются в отсутствии газогеохимических аномалий.

Метанотрофные, метаногенные, карбоксиобактерии, водородные, ацетогенные прокариоты способны к фиксации газов и превращении их в органическое вещество. Прокариоты, способные к утилизации длинных и циклических углеводов, так же могут синтезировать большой спектр органических соединений, в первую очередь карбоновых кислот. Карбоновые кислоты являются основным субстратом для роста большого количества функциональных групп, в частности, сульфатредукторов. Сульфатредукторы сопряжены в цикле углерода с метанотрофами и углеводородокисляющими прокариотами, что позволяет им с помощью синтрофных отношений окислять метан и длинные углеводороды в анаэробных условиях в толще донных отложений.

Биоиндикация в геомикробиологии на современном этапе осуществляется, в основном, с помощью молекулярно-генетических и культуральных методов. В тотальной ДНК морских донных отложений проводят исследования функциональных генов бактериального окисления метана *pmoA*, аэробного и анаэробной деструкции углеводов *alkB* и *masD*, сульфатредукции *dsrB* и метагенеза *mcrA*. В качестве примера полученных результатов можно привести работы в северной части Японского моря. Так, при сравнении района, где были обнаружены газогидраты, и района с высокими концентрациями метана, но без газогидратов, были выявлены существенные различия в обнаружении функциональных индикаторных генов, таксономическом составе углеводородокисляющей микробиоты и в их свойствах. Только в газогидратном районе фиксировали представителей *Nocardiaceae* и с наибольшей частотой обнаруживались гены анаэробной деструкции линейных углеводов (Валитов и др., 2019).

В Южно-Китайском море было зафиксировано совместное существование метанотрофных и сульфатредуцирующих бактерий в районе сульфидной минерализации (обнаружения пиритов и марказитов) (Еськова и др., 2020).

Описана способность углеводородокисляющих микроорганизмов, выделенных из донных отложений в районе аномальных газовых полей в Карском, Японском, Охотском, Южно-Китайском морях и проливах Брансфилд (Антарктика) и Татарском, к деструкции углеводов, как в аэробных, так и анаэробных условиях.

Сравнительный анализ обнаружения термо-, мезо- и психрофильных микроорганизмов выявил приуроченность термофилов к району газофлюидной разгрузки в донных отложениях Карского моря и толще вод пролива Брансфилд (Полоник и др., 2020; Пономарева и др., 2021).

В дальнейшем планируется провести сравнения между микробиомами разных типов залежей нефти и газа с помощью метагеномных методов. По этому направлению авторы активно сотрудничают с Центром НБИКС ФИЦ «Курчатовский институт».

Эти сведения указывают на высокую актуальность включения геомикробиологических методов не только в поисковые работы, но и для использования в прикладных целях – разработка новых биопрепаратов из морских микроорганизмов в целях биоремедиации загрязненных средств. Это является перспективным направлением в первую очередь для реализации задач, сформулированных в Указе Президента РФ по развитию природоподобных технологий.

Заключение

Таким образом, даже на примере морей Дальневосточного региона России в статье убедительно доказывается высокий минерально-ресурсный потенциал российского шельфа. Этот потенциал может быть значительно увеличен благодаря поискам МПИ в районах морского дна в пределах новых площадей государственного шельфа (закрепленных за РФ в результате заявок в ООН) в Северном Ледовитом океане, Охотском море. Работы по программе внешняя граница континентального шельфа РФ необходимо усилить.

Необходимо изучить геофизические поля и топографию вулканических гор и возвышенностей в пределах ИЭЗ РФ и в нейтральных водах с целью прироста минерально-сырьевой базы. Необходимо выполнить представительный отбор образцов с различных глубинных интервалов, в том числе с помощью современного оборудования, такого как телегрейферы российского производства. В геофизический комплекс необходимо ввести многолучевое эхолотирование, сейсмические исследования методом преломленных волн и глубинное зондирование земной коры донными сейсмическими станциями.

Очевидно, что методы прямых наблюдений в океане в настоящее время не могут быть замещены методами дистанционных измерений или моделирования.

Важным аспектом изучения подводной минеральной сырьевой базы являются экологические исследования окружающей среды, направленные на сохранение экосистем. В этой связи одновременно с геолого-геофизическими исследованиями в экспедиционных исследованиях непрерывно выполняется комплекс океанографических, гидрохимических, биологических и других работ.

Необходимо отметить и некоторые проблемы на пути к развитию МСБ России:

1. Большая часть акваторий ДВФО, Тихого и Северного Ледовитого океанов не достаточно изучена геолого-геофизическими методами, не выполнено комплексное геокартирование, а без этого невозможно проводить поисковые и разведочные работы на большинство ПИ, особенно твердых, РЗЭ и др.

2. Слабая техническая оснащенность геолого-геофизическим оборудованием на научно-исследовательских судах и береговых лабораториях организаций геолого-геофизического профиля.

3. Неизбежное устаревание и выход из строя специализированных геолого-геофизических судов неограниченного района плавания для выполнения площадных съемок и поисковых рейсов.

4. Медленное воспроизводство профессиональных кадров для выполнения морских научных исследований.

Решение задач в изучении и освоении минеральных ресурсов и геокартирования Мирового океана требует не только модернизации имеющихся и разработки новых технических средств, включая современные НИС и подводную робототехнику, но и разработки системных подходов к организации морских научно-прикладных исследований по освоению МСБ и на стратегически важных для России морских акваториях.

За произошедшим разделом шельфа осуществляются попытки раздела открытых районов Мирового океана, где сосредоточены огромные запасы минеральных и биологических ресурсов. Все морские державы, включая Китай, Японию, Южную Корею, Тайвань, Вьетнам, США, Францию, наращивают современный научно-исследовательский флот, оснащая научные суда глубоководными подводными аппаратами, расширяют районы морских экспедиций, организуют новые исследовательские институты, направленные на изучение минеральных ресурсов Мирового океана. Для России крайне важно не допустить технического отставания в этом направлении во избежание будущих ограничений доступа к огромным ресурсным запасам Мирового океана.

Существует объективная необходимость создания национального научного депозитария морских и океанических кернов, руд, пород и минералов.

В завершении заметим, что в России, по анализу мнений ученых организаций из разных ведомств, требуется создание нового океанографического центра, организации, на базе которой можно будет проводить межведомственные и международные морские научные исследования, направленные на преодоление и упреждение вызовов, связанных с освоением ресурсов Мирового океана.

Благодарности. Авторы благодарят участников экспедиций, Департамент координации деятельности научных организаций Минобрнауки России и НацОНИФ за содействие в организации экспедиций, руководителей организаций участников за поддержку авторских исследований. Основные результаты получены в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№ 124022100076-3; № 124022100082-4; № 124022100078-7; № 124022100084-8, № 124072000018-9).

Список литературы

1. Астахов А. С., Астахова Н. В. Потенциальные минеральные ресурсы марганца в Охотском и Японском морях // Вестник ДВО РАН. 2003. № 4 (110). С. 141–150.
2. Астахов А. С., Ивин В. В., Карнаух В. Н., Коптев А. А., Ли Б. Я., Суховеев Е. Н. Современные геологические процессы и условия формирования баритовой залежи в котловине Дерюгина Охотского моря // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 2. С. 200–214.
3. Астахов А. С., Семилетов И. П., Самтарова В. В., Ши Сюефа, Ху Лимин, Аксентов К. И., Василенко Ю. П., Иванов М. В. Редкоземельные элементы донных осадков Восточно-арктических морей России как индикаторы терригенного сноса // Доклады Академии наук. 2018. Т. 482. № 4. С. 451–455.

4. Астахова Н. В. Железомарганцевые корки центральной котловины Японского моря // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 5. С. 384–396.
5. Астахова Н. В., Лопатников Е. А. Состав и парагенетические ассоциации массивного пиролюзита из глубоководной котловины Японского моря // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 10. С. 1861–1874.
6. Астахова Н. В., Лопатников Е. А. Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России) // Природа. 2017. № 12. С. 45–51.
7. Астахова Н. В., Липкина М. И., Мельниченко Ю. И. Гидротермальная баритовая минерализация во впадине Дерюгина Охотского моря // Доклады Академии наук СССР. 1987. Т. 295. № 1. С. 212–215.
8. Астахова Н. В., Нарнов Г. А., Якушева И. Н. Карбонатно-баритовая минерализация во впадине Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология. 1990. Т. 9. № 3. С. 37–42.
9. Астахова Н. В., Саттарова В. В. Геохимия железомарганцевых образований центральной части Охотского моря // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 29–33.
10. Батулин Г. Н. Геохимия гидротермальных железомарганцевых корок Японского моря // Доклады Академии наук. 2012. Т. 445. № 2. С. 179.
11. Валитов М. Г., Шакиров Р. Б., Яцук А. В., Прошкин З. Н., Ли Н. С., Аксентов К. И., Обжиров А. И., Съедин В. Т., Пономарева А. Л., Карнаух В. Н. Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе в 81-ом рейсе НИС «Академик М. А. Лаврентьев» // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 4. С. 97–105.
12. Валтетер А. П., Лихт Ф. Р. Карта россыпной металлоносности шельфа окраинных морей Востока СССР // Проблемы морских минеральных ресурсов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 4–48.
13. Владыкин Н. В., Торбеева Т. С. Лампроиты Томторского массива (восточное Прианбарье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 10. С. 1038–1049.
14. Воробьев А. Е., Болатова А. Б., Молдабаева Г. Ж., Чекушина Е. В. Экспертная оценка современных мировых запасов аквальных залежей газогидратов // Специализированный журнал: Бурение и нефть [Электронный ресурс]. 2011. Декабрь. <https://burneft.ru/archive/issues/2011-12/1> (дата обращения: 16.02.2016).
15. Гресов А. И., Яцук А. В. Газогеохимические показатели углефтегазоносности осадочных бассейнов и геоструктур центральной и западной частей Восточно-Сибирского моря // Геология нефти и газа. 2023. № 1. С. 95–110.
16. Деркачев А. Н., Борман Г., Грайнерт Й., Можеровский А. В. Аутигенная карбонатная и баритовая минерализация в осадках впадины Дерюгина (Охотское море) // Литология и полезные ископаемые. 2000. № 6. С. 568–585.
17. Добрецов Н. Л., Метелкин Д. В., Василевский А. Н. Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 1. С. 10–30.
18. Еськова А. И., Пономарева А. Л., Легкодимов А. А., Калгин В. Ю., Шакиров Р. Б., Обжиров А. И. Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 33–43.
19. Коган И. Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. Издание 2. М.: Недра, 1974. 304 с.
20. Козлов С. А., Неизвестнов Я. В. Пространственная изменчивость физико-механических свойств донных отложений нефтегазоносной области Баренцево-Карского шельфа // Морские инженерно-геологические исследования. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. С. 79–85.

21. Колесник О. Н., Колесник А. Н. Особенности химического и минерального состава железомарганцевых конкреций Чукотского моря // Геология и геофизика. 2013. Т. 54 (7). С. 853–866.
22. Колесник О. Н., Колесник А. Н., Жэнь Сянвэнь, Карабцов А. А., Астахов А. С., Ши Сюэфа Первые данные о распределении редкоземельных элементов в железомарганцевых образованиях моря Лаптевых // ДАН. 2021. Т. 497. № 1. С. 37–43.
23. Колесник О. Н., Колесник А. Н., Астахов А. С., Селютин С. А., Жэнь С., Ши С. Содержание и состав редкоземельных элементов в железомарганцевых образованиях Восточно-Сибирского моря как отражение современных условий седиментации и диагенеза // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508 (1). С. 63–70.
24. Крапивнер Р. Б. Геологические аспекты методики поисков аллохтонных россыпей золота на шельфе западной Камчатки // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1975. № 11. С. 90.
25. Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Карманов Н. С., Толстов А. В., Дарьин А. В., Баранов Л. Н. Особенности состава и микроморфологии минералов редкоземельных элементов массива Томтор // Сборник материалов совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР «Геология и минерагения Северной Евразии». 2017. С. 123–124.
26. Макогон Ю. Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5–21.
27. Мелкий В. А. Петрогенетическая информативность железо-титан-оксидных минералов вулканических комплексов Большой Курильской дуги: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1995. 26 с.
28. Мелкий В. А. Петрогенезис железо-титан-оксидных минералов в вулканических комплексах Большой Курильской гряды. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. 143 с.
29. Мелкий В. А., Верхотуров А. А. Россыпи железосодержащих минералов в Сахалинской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 1. С. 6–18.
30. Патык-Кара Н. Г. Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. Москва, 2008. 528 с.
31. Плетнев С. П., Мельников М. Е., Съедин В. Т., Седышева Т. Е., Авдонин В. В., Анохин В. М., Захаров Ю. Д., Пунина Т. А., Смирнова О. Я. Геология гайотов Магеллановых гор (Тихий океан). Владивосток: Дальнаука, 2020. 200 с.
32. Полоник Н. С., Пономарева А. Л., Шакиров Р. Б. Глубоководная метановая аномалия в проливе Брансфилд (Антарктика) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 32. С. 61–76.
33. Пономарева А. Л., Полоник Н. С., Обжиров А. И., Шакиров Р. Б., Григоров Р. А., Шмале О., Мау С. Взаимосвязь распределения метана и психро-, мезо- и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 4. С. 389–398.
34. Пуцаровский Ю. М. Тектоника Земли. Т. 1: Тектоника и геодинамика. М.: Наука, 2005. С. 9–32.
35. Саломатин А. С., Юсупов В. И. Акустическая оценка проявлений баритовой минерализации в Охотском море // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 474–477.
36. Съедин В. Т., Плетнев С. П., Седышева Т. Е. Вулканические комплексы и тектономагматические этапы эволюции Магеллановых гор (Тихий океан). Сообщение 2: Тектономагматические этапы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 3. Вып. 59. С. 67–86.
37. Толстов А. В., Коноплев А. Д., Кузьмин В. И. Особенности формирования уникального редкометального месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 20–26.

38. Толстов А. В., Похиленко Н. П., Лапин А. В., Крюков В. А., Самсонов Н. Ю. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.
39. Углов Б. Д., Мельников М. Е. Тектоника рудной провинции Магеллановых гор Тихого океана по геофизическим данным // Руды и металлы. 2015. № 4. С. 26–38.
40. Шакиров Р. Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 2018. 341 с.
41. Якуцени В. П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8. № 4. http://www.ngtp.ru/rub/9/50_2013.pdf.
42. Aloisi G., Wallmann K., Haese R. R., Saliege J.-F. Chemical, biological and hydrological controls on the 14C content of cold seep carbonate crusts: numerical modeling and implications for convection at cold seeps // Chemical Geology. 2004. Vol. 213. P. 359–383.
43. Astakhov A. S., Sattarova V. V., Shi Xuefa, Hu Limin, Aksentov K. I., Alatortsev A. V., Kolesnik O. N., Mariash A. A. Distribution and Sources of Rare Earth Elements in Sediments of the Chukchi and East Siberian Seas // Polar Science. 2019. Vol. 20. P. 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.005>.
44. Astakhova N. V. Hydrothermal barite in the Okhotsk sea // Resource Geology. 1993. Vol. 43. No. 17. P. 169–172.
45. Collett T. S., Riedel M., Cochran J. R., Boswell R., Kumar P., Sathe A. V., Dasgupta S. Indian continental margin gas hydrate prospects: Results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) Expedition 01 // Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008). 2008.
46. Fagel N., Not C., Gueibe J., Mattielli N., Bazhenova E. Late Quaternary evolution of sediment provenances in the Central Arctic Ocean: mineral assemblage, trace element composition and Nd and Pb isotope fingerprints of detrital fraction from the Northern Mendeleev Ridge // Quat. Sci. Rev. 2014. Vol. 92. P. 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.12.011>.
47. Gresov A. I., Yatsuk A. V., Aksentov K. I. Lithological Composition and Hydrocarbon Anomalies of Bottom Sediments in the Western Part of the East Siberian Sea // Lithology and Mineral Resources. 2023. Vol. 58 (1). P. 16–31. <https://doi.org/10.1134/S0024490223010029>.
48. Gaurav D., Yadav U. S. Challenges and Opportunities in Exploitation of Gas Hydrate Resources in Krishna Godavari Offshore Basin of India. 2021.
49. Kastner M., Kvenvolden K. A., Lorenson T. Chemistry, isotopic composition, and origin of methane hydrogen sulfide hydrate at the Cascadia subduction zone // Earth and Planetary Science Letters. 1998. Vol. 156 (3–4). P. 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00013-2).
50. Kvenvolden K. A., Ann. N. Y. Methane and other hydrocarbon gases in marine sediments // Fcfd. Sci. 1994. Vol. 715. P. 232–246.
51. Ojha M., Ghosh R. Gas Hydrate Potential Along The Eastern Continental Margin of India // BMJ Special Issue. 2021. P. 85–102.
52. Sain K., Ojha M., Satyavani N., Ramadass G. A., Ramprasad T., Das S., Gupta H. Gas-hydrates in Krishna-Godavari and Mahanadi Basins: New data // Journal of the Geological Society of India. 2012. Vol. 79 (6). P. 553–556. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0094-z>.
53. Sattarova V. V., Astakhov A. S., Aksentov K. I., Shi Xuefa, Hu Limin, Liu Yanguang, Polyakov D. M., Alatortsev A. V., Kolesnik O. N. Geochemistry of the Laptev and East Siberian seas sediments with emphasis on rare-earth elements: Application for sediment sources and paleoceanography // Continental Shelf Research. 2023. Vol. 254. P. 104907. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104907>.
54. Shakirov R. B., Khazanova E. S., Stepanchik I. E. New Data on the Patterns of Methane Distribution over the Arctic Shelf of Eurasia // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 511. P. 623–626. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600536>.

55. *Shankar U., Riedel M.* Heat flow and gas hydrate saturation estimates from Andaman Sea, India // *Marine and Petroleum Geology*. 2013. Vol. 43. P. 434–449.
56. *Yadav U. S., Shukla K. M., Ojha M., Kumar P., Shankar U.* Assessment of gas hydrate accumulations using velocities derived from vertical seismic profiles and acoustic log data in Krishna-Godavari Basin, India // *Marine and Petroleum Geology*. 2019. Vol. 108. P. 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.02.001>.
57. *Yatsuk A. V., Gresov A. I., Vasilenko Yu. P., Shvalov D. A., Sergienko V. I.* Gas-geochemical anomalies of hydrocarbon gases in the bottom sediments of the Lomonosov ridge and Podvodnikov basin of the Arctic ocean // *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 501. No. 2. P. 1081–1086.
58. *Yatsuk A. V., Gresov A. I., Snyder G. T.* Hydrocarbon gases in seafloor sediments of the edge shelf zone of the East Siberian sea and adjacent part of the Arctic ocean // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. P. 856496.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024, одобрена к печати 06.06.2024.

Для цитирования: Шакиров Р. Б., Съедин В. Т., Яцук А. В., Саттарова В. В., Астахова Н. В., Колесник О. Н., Валитов М. Г., Ли Н. С., Шакирова М. В., Плетнев С. П., Пономарева А. Л., Мальцева Е. В., Nengyou Wu, Le Duc Anh, Pawan Dewangan, Савельева Е. Э. Результаты научных экспедиционных геолого-геофизических исследований полезных ископаемых морей Дальневосточного региона Российской Федерации и Тихого океана (проект «ГЕОМИР») // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (2). С. 72–106. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).5).

**THE RESULTS OF SCIENTIFIC EXPEDITIONARY GEOLOGICAL
AND GEOPHYSICAL STUDIES OF MINERAL RESOURCES
IN FAR EASTERN SEAS OF THE RUSSIAN FEDERATION
AND THE PACIFIC OCEAN (GEOMIR PROJECT)**

**R. B. Shakirov¹, V. T. Sedin¹, A. V. Yatsuk¹, V. V. Sattarova¹, N. V. Astakhova¹,
O. N. Kolesnik¹, M. G. Valitov¹, N. S. Li¹, M. V. Shakirova², S. P. Pletnev¹,
A. L. Ponomareva¹, E. V. Maltseva¹, Wu Nengyou³, Anh Le Duc⁴,
Dewangan Pawan⁵, E. E. Savelieva¹**

¹*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
43 Baltiyskaya str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: ren@poi.dvo.ru;*

²*Pacific Institute of Geography FEB RAS,
7, Radio str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: mvovna@mail.ru;*

³*Qingdao Institute of Marine Geology, Geological Survey,
Ministry of Natural Resources of China,
Fuzhou Rd, Qingdao 266071, PR China, e-mail: wuny@ms.giec.ac.cn;*

⁴*Institute of Marine Geology and Geophysics,
Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam
e-mail: leducanh010282@gmail.com;*

⁵*National Institute of Oceanography, CSIR, Goa, India,
e-mail: pdewangan@nio.org*

The paper presents a brief overview of the results of integrated geological, geophysical and oceanographic studies for the period 2017–2023, for which interregional generalizations were made on some promising areas of study of underwater mineral resources and the environment. The data on geological underwater objects, in particular, manganese ores of the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk and adjacent water areas; rare-earth ores of the Tomtor ore cluster, ancient and modern coastal-marine placers of the Laptev Sea coast are presented; barite ore occurrences “Barite Hills” (in the Sea of Okhotsk); ferromanganese formations of the Eastern Arctic shelf of Russia; coastal marine placers of the shelf and coast of the Far Eastern seas, including gold-bearing placers. including gold-bearing placers of the shelf zone of the south of Primorye and north of Sakhalin, titanomagnetite placers of the Kuril Islands, gold-bearing placers of the North Sakhalin Plain and others. Direct signs of hydrocarbons were obtained in areas previously considered unpromising (including the South China Sea), gas hydrate accumulations were mapped and studied in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, prospecting for gas hydrates in the Bering Sea was prepared, and comparative studies of hydrate-bearing capacity of the marginal seas of the NW Pacific and the Indian Ocean were carried out. The main features of the distribution of lithologic and gas-geochemical indicators of hydrocarbon gases in bottom sediments of the southwestern sector of the East Siberian Sea, which is the least studied in terms of oil and gas content, were studied. Based on the data of gas-geochemical studies, the prospects of oil and gas content of the eastern shelf of the Arctic were assessed. The results of geomicrobiological studies in the seas of the Far East region are described. In some cases deep-sea sediments themselves (peloid-like sediments, etc.) appear to be a separate huge mineral resource. At present, the “continent-ocean” transition zone and neutral waters can become the most important source of replenishing the mineral resource base of these mineral components. The presented research corresponds to the main objectives of the GEOMIR project of the national action plan within the UN Decade of Ocean Sciences for Sustainable Development (2021–2030) and was carried out mainly in accordance with the directions of the state assignment. Studies of gas hydrates were carried out within the framework of the WESTPAC working group “Gas hydrates and methane fluxes in the Indo-Pacific region” (CoSGas, 2021–2024), established on the initiative and under the leadership of Russia.

Keywords: complex geological and geophysical research, mineral resources, gasgeochemistry, geomicrobiology, gas hydrates, environment, Russian shelf, Sea of the Far East of Russia, Arctic

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the participants of the expeditions, the Department of Coordination the Activities of Scientific Organizations of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the National Science Foundation for their assistance in organizing the expeditions, the heads of the participating organizations for supporting the author's research. The main results were obtained within the framework of the state task of the POI FEB RAS (No. 124022100076-3; No. 124022100082-4; No. 124022100078-7; No. 124022100084-8, № 124072000018-9).

References

1. Aloisi, G., K. Wallmann, R. R. Haese, and J.-F. Saliege 2004: Chemical, biological and hydrological controls on the ^{14}C content of cold seep carbonate crusts: numerical modeling and implications for convection at cold seeps. *Chemical Geology*, **213**, 359–383.
2. Astakhov, A. S., V. V. Sattarova, Xuefa Shi, Limin Hu, K. I. Aksentov, A. V. Alatortsev, O. N. Kolesnik, and A. A. Mariash, 2019: Distribution and Sources of Rare Earth Elements in Sediments of the Chukchi and East Siberian Seas. *Polar Science*, **20**, 148–159, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.005>.
3. Astakhova, N. V., 1993: Hydrothermal barite in the Okhotsk sea. *Resource Geology*, **43** (1), 169–172.
4. Astakhov, A. S. and N. V. Astakhova, 2003: Potential manganese mineral resources in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, **4** (110), 141–150.
5. Astakhov, A. S., V. N. Karnaukh, A. A. Koptev, B. Ya. Li, E. N. Sukhoveev, and V. V. Ivin, 2017: Barite mineralization in the Deryugin basin of the Okhotsk sea: active processes and formation conditions. *Russian Geology and Geophysics*, **58** (12), 1468–1477, <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.01.002>.
6. Astakhov, A. S., I. P. Semiletov, V. V. Sattarova, X. Shi, L. Hu, K. I. Aksentov, Yu. P. Vasilenko, and M. V. Ivanov, 2018: Rare earth elements in the bottom sediments of the East Arctic seas of Russia as indicators of terrigenous input. *Doklady Earth Sciences*, **482** (4), 1324–1327, <https://doi.org/10.1134/S1028334X18100021>.
7. Astakhova, N. V., 2018: Ferromanganese crusts in the central basin, Sea of Japan. *Lithology and mineral resources*, **53** (5), 349–360, <https://doi.org/10.1134/S0024490218050024>.
8. Astakhova, N. V. and E. A. Lopatnikov, 2016: Composition and parageneses of massive pyrolusite from the deep-water basin of the sea of Japan. *Russian Geology and Geophysics*, **57** (10), 1465–1476, <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.003>.
9. Astakhova, N. V. and E. A. Lopatnikov, 2017: Manganese ores of the Sea of Japan (the Russian economic zone). *Nature*, **12** (1228), 45–51.
10. Astakhova, N. V., M. I. Lipkina, and Yu. I. Melnichenko, 1987: Hydrothermal barite mineralization in the Deryugin basin of the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences of the USSR*, **295** (1), 212–215.
11. Astakhova, N. V., G. A. Narnov, and I. N. Yakusheva, 1990: Carbonate-barite mineralization in the Deryugin basin (Sea of Okhotsk). *Pacific Geology*, **9** (3), 37–42.
12. Astakhova, N. V. and V. V. Sattarova, 2005: Geochemistry of ferromanganese formations in the central part of the Sea of Okhotsk. *Volcanology and seismology*, **3**, 29–33.

13. Baturin, G. N., 2012: Geochemistry of hydrothermal ferromanganese crusts of the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, **445** (1), 862–867, <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070112>.
14. Collett, T. S., M. Riedel, J. R. Cochran, R. Boswell, P. Kumar, A. V. Sathe, and S. Dasgupta, 2008: Indian continental margin gas hydrate prospects: Results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) Expedition 01. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*.
15. Derkachev, A. N., G. Borman, Y. Greinert, and I. V. Mozherovskiy, 2000: Autigenic carbonate and barite mineralization in sediments of the Deryugin basin (Sea of Okhotsk). *Lithology and Mineral Resources*, **35** (6), 504–508, <https://doi.org/10.1023/a:1026641230166>.
16. Dobretsov, N. L., D. V. Metelkin, and A. N. Vasilevskiy, 2021: Typical characteristics of the Earth's magnetic and gravity fields related to global and regional tectonics. *Russian Geology and Geophysics*, **62** (1), 6–24, <https://doi.org/10.2113/RGG20204261>.
17. Eskova, A. I., A. L. Ponomareva, A. A. Legkodimov, V. Yu. Kalgin, R. B. Shakirov, and A. I. Obzhirov, 2020: The characteristics and distribution of indicator microorganisms in the marine sediments from the South China Sea. *Izvestiya Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, **33**, 33–43, <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.33>.
18. Fagel, N., C. Not, J. Gueibe, N. Mattielli, and E. Bazhenova, 2014: Late Quaternary evolution of sediment provenances in the Central Arctic Ocean: mineral assemblage, trace element composition and Nd and Pb isotope fingerprints of detrital fraction from the Northern Mendeleev Ridge. *Quat. Sci. Rev.*, **92**, 140–154, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.12.011>.
19. Gaurav, D. and U. S. Yadav, 2021: *Challenges and Opportunities in Exploitation of Gas Hydrate Resources in Krishna Godavari Offshore Basin of India*.
20. Gresov, A. I., A. V. Yatsuk, and K. I. Aksentov, 2023: Lithological Composition and Hydrocarbon Anomalies of Bottom Sediments in the Western Part of the East Siberian Sea. *Lithology and Mineral Resources*, **58** (1), 16–31, <https://doi.org/10.1134/S0024490223010029>.
21. Gresov, A. I. and A. V. Yatsuk, 2023: Gasgeochemical indicators of coal, oil and gas potential of sedimentary basins and geostructures in the central and western part of the East Siberian Sea. *Geologiya nefti i gaza*, **1**, 95–110, <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-1-95-110>.
22. Kastner, M., K. A. Kvenvolden, and T. Lorenson, 1998: Chemistry, isotopic composition, and origin of methane hydrogen sulfide hydrate at the Cascadia subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **156** (3–4), 173–183, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00013-2).
23. Kogan, I. D., 1974: *Calculation of reserves and geological and industrial assessment of ore deposits. Edition 2*. Moscow, Nedra, 304 p.
24. Kolesnik, O. N. and A. N. Kolesnik, 2013: Specific chemical and mineral composition of ferromanganese nodules from the Chukchi Sea. *Russian Geology and Geophysics*, **54** (7), 653–663, <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.06.001>.
25. Kolesnik, O. N., A. N. Kolesnik, A. S. Astakhov, X. Ren, X. Shi, and A. A. Karabtsov, 2021: First data on the distribution of rare-earth elements in ferromanganese deposits of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, **497** (1), 217–222, <https://doi.org/10.1134/S1028334X21030065>.
26. Kolesnik, O. N., A. N. Kolesnik, A. S. Astakhov, S. A. Selyutin, X. Ren, and X. Shi, 2023: The content and composition of rare-earth elements in ferromanganese formations of the East-Siberian Sea as a reflection of modern conditions of sedimentation and diagenesis. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, **508** (1), 79–87.
27. Kozlov, S. A. and Ya. V. Neizvestnov, 2003: Spatial variability of physical and mechanical properties of bottom sediments of the oil and gas bearing region of the Barents-Kara shelf. *Marine engineering and geological studies*, St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 79–85.
28. Krapivner, R. B., 1975: Geological aspects of the prospect methodology for allochthonous gold placers on the shelf of western Kamchatka. *Izvestia of higher educational institutions. Geology and exploration*, **11**, 90.

29. Kvenvolden, K. A. and N. Y. Ann, 1994: Methane and other hydrocarbon gases in marine sediments. *Fcfd. Sci*, **715**, 232–246.
30. Lazareva, E. V., S. M. Zhmodik, N. S. Karmanov, A. V. Tolstov, A. V. Darin, and L. N. Baranov, 2017: Features of the composition and micromorphology of minerals of rare-earth elements of the Tomtor massif. *Collection of materials of the meeting dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology and Geophysics of the SB Academy of Sciences of the USSR "Geology and Mineralogy of Northern Eurasia"*, 123–124.
31. Makogon, Yu. F., 2010: Gas hydrates. History of study and prospects of the development. *Geology and minerals of the World Ocean*, **2**, 5–21.
32. Melky, V. A., 1995: Petrogenetic informativeness of iron-titanium-oxide minerals of volcanic complexes of the Great Kuril Arc. *Abstract. ... candidate of Geol.-Mineral Sciences*, Moscow, Moscow State University, 26 p.
33. Melky, V. A., 2010: *Petrogenesis of iron-titanium oxide minerals in volcanic complexes of the Great Kuril Ridge*, Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, 143 p.
34. Melky, V. A. and A. A. Verkhoturov, 2019: Placers of iron-containing minerals in the Sakhalin region. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, **330** (1), 6–18.
35. Ojha, M. and R. Ghosh, 2021: Gas Hydrate Potential Along The Eastern Continental Margin of India. *BMJ Special Issue*, 85–102.
36. Patyk-Kara, N. G., 2008: *Mineralogy of placers: types of placer provinces*. Moscow, 528 p.
37. Pletnev, S. P., M. E. Melnikov, V. T. Sedin, T. E. Sedysheva, V. V. Avdonin, V. M. Anokhin, Yu. D. Zakharov, T. A. Punina, and O. Ya. Smirnova, 2020: *Geology of the guyots of the Magellan SeaMounts (Pacific Ocean)*. Vladivostok, Dalnauka, 200 p.
38. Polonik, N. S., A. L. Ponomareva, and R. B. Shakirov, 2020: Deep-sea methane anomaly in the Bransfield Strait (Antarctica). *Izvestiya of the Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, **32**, 61–76, <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.32.61>.
39. Ponomareva, A. L., N. S. Polonik, A. I. Obzirov, R. B. Shakirov, R. A. Grigorov, O. Shmale, and S. Mau, 2021: Interrelation of methane distribution with psychro-, meso- and thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the bottom sediments of the Kara Sea. *Geosystems of Transition Zones*, **5** (4), 389–398, <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.389-393.394-398>.
40. Pusharovskiy, Yu. M., 2005: *Earth Tectonics. 1. Tectonics and geodynamics*. Moscow, Nauka, 9–32.
41. Sain, K., M. Ojha, N. Satyavani, G. A. Ramadass, T. Ramprasad, S. Das, and H. Gupta, 2012: Gas-hydrates in Krishna-Godavari and Mahanadi Basins: New data. *Journal of the Geological Society of India*, **79** (6), 553–556, <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0094-z>.
42. Salomatin, A. S. and V. I. Yusupov, 2009: Acoustic estimate of barite mineralization manifestation in the Sea of Okhotsk. *Oceanology*, **49** (3), 474–477, <https://doi.org/10.1134/S0001437009030175>.
43. Sattarova, V. V., A. S. Astakhov, K. I. Aksentov, Xuefa Shi, Limin Hu, Yanguang Liu, D. M. Polyakov, A. V. Alatortsev, and O. N. Kolesnik, 2023: Geochemistry of the Laptev and East Siberian seas sediments with emphasis on rare-earth elements: Application for sediment sources and paleoceanography. *Continental Shelf Research*, **254**, 104907, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104907>.
44. Sedin, V. T., S. P. Pletnev, and T. E. Sedysheva, 2023: Volcanic complexes and tecton-magmatic stages of the evolution of the Magellan Mounts (Pacific Ocean). Message 2: Tecton-magmatic stages. *VESTNIK of KRAUNTS. Earth Sciences*, **3** (59), 67–86, <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-67-86>.
45. Shakirov, R. B., 2018: *Gasgeochemical fields of the Eastern Asia Marginal seas*. Moscow, GEOS, 341 p.
46. Shakirov, R. B., E. S. Khazanova, and I. E. Steepochkin, 2023: New Data on the Patterns of Methane Distribution over the Arctic Shelf of Eurasia. *Doklady Earth Sciences*, **511**, 623–626, <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600536>.

47. Shankar, U. and M. Riedel, 2013: Heat flow and gas hydrate saturation estimates from Andaman Sea, India. *Marine and Petroleum Geology*, **43**, 434–449.
48. Tolstov, A. V., A. D. Konoplev, and V. I. Kuzmin, 2011: The peculiarities of forming the unique rare metal deposit Tomtor and estimation of perspectives of its industrial. *Exploration and protection of mineral resources*, **6**, 20–26.
49. Tolstov, A. V., N. P. Pokhilenko, A. V. Lapin, V. A. Kryukov, and N. Y. Samsonov, 2014: Investment appeal of Tomtor deposit and prospect of its increase. *Exploration and protection of mineral resources*, **9**, 25–30.
50. Uglov, B. D. and M. E. Melnikov, 2015: Tectonics of the ore province of the Magellan Seamounts of the Pacific Ocean according to geophysical data. *Ores and metals*, **4**, 26–38.
51. Valitov, M. G., R. B. Shakirov, A. V. Yatsuk, Z. N. Proshkina, N. S. Li, K. I. Aksentov, A. I. Obzirov, V. T. Sedin, A. L. Ponomareva, and V. N. Karnaukh, 2019: Integrated geological-geophysical, gas-geochemical and oceanographic researches in the Sea of Japan and the Tatar Strait in the 81 cruise of the R/V “Akademik M. A. Lavrentiev”. *Pacific Geology*, **38** (4), 97–105.
52. Valpeter, A. P. and F. R. Licht, 1984: Map of placer metalliferous shelf of the marginal seas of the East of the USSR. *Problems of marine mineral resources*, Vladivostok, FESC of the USSR Academy of Sciences, 4–48.
53. Vladykin, N. V. and T. S. Torbeeva, 2005: Lamproit of the Tomatorsky massif (eastern Anabar region). *Geology and Geophysics*, **46** (10), 1038–1049.
54. Vorobiov, A. E., A. B. Bolatova, G. Zh Moldabaeva, and E. V. Chekushina, 2011: Expert evaluation of the current world aquatic gas hydrate reserves. *Specialized journal: Drilling and oil* [Electronic resource]. December. <https://burneft.ru/archive/issues/2011-12/1> (date of reference: 02/16/2016).
55. Yadav, U. S., K. M. Shukla, M. Ojha, P. Kumar, and U. Shankar, 2019: Assessment of gas hydrate accumulations using velocities derived from vertical seismic profiles and acoustic log data in Krishna-Godavari Basin, India. *Marine and Petroleum Geology*, **108**, 551–561, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.02.001>.
56. Yakutseni, V. P., 2013: Gas hydrates – unconventional gas sources, their formation, properties, distribution and geological resources. *Oil and gas geology. Theory and practice*, **8** (4), 12, http://www.ngtp.ru/rub/9/50_2013.pdf.
57. Yatsuk, A. V., A. I. Gresov, Yu. P. Vasilenko, D. A. Shvalov, and V. I. Sergienko, 2021: Gas-geochemical anomalies of hydrocarbon gases in the bottom sediments of the Lomonosov ridge and Podvodnikov basin of the Arctic ocean. *Doklady Earth Sciences*, **501** (2), 1081–1086.
58. Yatsuk, A. V., A. I. Gresov, and G. T. Snyder, 2022: Hydrocarbon gases in seafloor sediments of the edge shelf zone of the East Siberian sea and adjacent part of the Arctic ocean. *Frontiers in Earth Science*, **10**, 856496.

Submitted 26.02.2024, accepted 06.06.2024.

For citation: Shakirov, R. B., V. T. Sedin, A. V. Yatsuk, V. V. Sattarova, N. V. Astakhova, O. N. Kolesnik, M. G. Valitov, N. S. Li, M. V. Shakirova, S. P. Pletnev, A. L. Ponomareva, E. V. Maltseva, Wu Nengyou, Anh Le Duc, Dewangan Pawan, and E. E. Savelieva, 2024: The results of scientific expeditionary geological and geophysical studies of mineral resources in Far Eastern Seas of the Russian Federation and the Pacific Ocean (GEOMIR project). *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 72–106, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).5).