ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2025, том 65, № 2, с. 260–277

УДК 550.382; 550.389; 551.243; 552.578

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗОН ЭНДОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ В ОБЛАСТЯХ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ПО АНОМАЛИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2025 г. А. А. Петрова[1, *], О. В. Латышева[1, **]

[1]*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: aa_petrova@inbox.ru*

***e-mail: l-olli@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.07.2024 г.
После доработки 01.09.2024 г.
Принята к публикации 26.09.2024 г.

На основе интерпретации аномалий магнитного поля Земли и аномалий силы тяжести исследовано строение литосферы Арктических морей в районах повышенной газонасыщенности придонных отложений. Анализ магнитных и плотностных разрезов показал, что литосфера в зонах проявления метановых сипов и газогидратов характеризуется наличием терморазломов, выводящих флюидопотоки из земной коры и мантии. На участках акваторий, где по данным геохимических исследований подтверждены выходы метана глубинного генезиса, на петрофизических разрезах впервые прослежены траектории выхода флюидов, поднимающихся из глубин земной коры и мантии. Исследование влияния эндогенного флюидодинамического фактора дает возможность оптимизировать выбор безопасных маршрутов судоходства по Северному морскому пути в полях выделения метана.

Ключевые слова: Арктика, магнитные аномалии, эндогенные факторы, сипы газа

DOI: 10.31857/S0016794025020104, **EDN:** CXYINW

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря реализации национального проекта “Модернизация”, в задачу которого входит развитие Северного морского пути (СМП), создается логистическая система Северного морского транспортного коридора (СМТК).

Формирование прямого маршрута транспортно-логистической системы СМТК, соединяющей северо-западные регионы России с Дальним Востоком, создает кратчайший морской путь, позволяющий повысить связность внутри России и дать импульс, соединяющий азиатские рынки с северо-атлантическими и европейскими. Для воплощения этого плана необходимо обеспечить безопасное круглогодичное судоходство по СМП, что является приоритетом логистики энергетического потенциала страны.

Восточно-Сибирский арктический шельф находится в центре активных исследований из-за эмиссии газа и выявления повышенных концентраций метана в атмосфере и гидросфере, зафиксированных в ходе многочисленных экспедиций на шельфах Арктических морей [Baranov et al, 2020; Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Bogoyavlensky et al., 2018]. Вызывает беспокойство то, что часть обнаруженных газовзрывоопасных объектов расположена вблизи трасс СМП [Богоявленский и Кишанков, 2020].

Целью данной работы является исследование специфики строения литосферы морей Арктического шельфа в районах повышенной газонасыщенности придонных отложений, газовых залежей, выделений массированных выбросов метана и газопроявления “факельного типа” в Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях с применением анализа магнитных аномалий литосферы.

В зонах повышенной газонасыщенности влияние эндогенных природных факторов создает

риски безопасной навигации и нарушает проведение логистических операций судоходства на трассах СМП.

Результаты исследований Восточно-Сибирского арктического шельфа показывают аномально высокие концентрации растворенного CH_4. Потоки CH_4 к морскому дну были вызваны, главным образом, нарушением целостности вечной мерзлоты; поток проходил через идентифицированные пути миграции, а также через талики и разломные полыньи, ширина которых может достигать десятков километров [Shakhova et al., 2010].

Основным источником ледовой информации являются спутниковые данные дистанционного зондирования, обнаруживающие зоны деградации ледяного покрова [Юлин и др., 2019].

Спутниковые данные измерений магнитного поля Земли (МПЗ) позволяют оценить глубинное строение литосферы [Петрова и др., 2020; Петрова и др., 2022а; Харитонов и др., 2004].

Для выявления особенностей литосферы, оказывающих разрушающее воздействие на формирование ледяного покрова, использовались приземные магнитные данные модуля МПЗ [Копытенко и Петрова, 2016; Копытенко и Петрова, 2020]. По системам профилей, пересекающим зоны ускоренного таяния льда, построены магнитные и плотностные разрезы. Плотностные разрезы строятся по аномалиям силы тяжести [Bonvalot et al., 2012].

Анализ спутниковых наблюдений сезонных изменений толщины льда Арктики в период с 2007 по 2024 гг. показал, что изменяется как площадь ледяного покрова, так и его толщина. Потоки флюидов из глубин земной коры и мантии поднимаются по каналам термофлюидной проработки и выходят через сквозные талики, утончая лед, образуя проталины и разводья, что способствует разрушению льда. Проведенные исследования позволяют понять возможные причины локализации ареалов таяния льда.

Совместный анализ данных спутникового мониторинга толщины ледяного покрова с петрофизическими разрезами земной коры подтвердил, что за последние десятилетия важную роль в формировании ледового режима в акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) играет эндогенный флюидодинамический фактор [Petrova et al., 2022; Петрова и др., 2022; Петрова и др., 2020; Копытенко и др., 2020; Петрова и др., 2020а; Петрова и др., 2022а].

Исследования показали, что таяние ледяного покрова наиболее активно проявляется над выходами восходящих флюидопотоков из глубокофокусных линз флюидных слоев земной коры и мантии [Петрова и др., 2020]. Флюидные слои и каналы термоактивных разломов визуализируются на магнитных и плотностных разрезах как ослабленные зоны с низкой намагниченностью и пониженными плотностными свойствами [Петрова и др., 2020; Петрова и Копытенко, 2019].

Строение литосферы в зонах дегазации природных углеводородов имеет определенные особенности, отражающиеся в геофизических полях. Например, это показано в работе [Харитонов, 2022], где для изучения дегазационных неоднородностей, возникающих в верхних слоях литосферы, проводились комплексные исследования, основанные на данных спутниковых измерений магнитного и гравитационного полей с учетом данных о тепловом потоке.

В зонах потенциального накопления газовых гидратов [Bogoyavlensky et al., 2018; Shakhova et al., 2019] в Арктических морях выявлены зоны влияния флюидодинамического фактора. Пути миграции флюидных потоков земной коры и мантии, разрушающих ледяной покров, визуализированы на петрофизических разрезах в виде каналов с пониженными магнитными и плотностными свойствами. Это позволило сделать прогноз районов наиболее вероятного возникновения чрезвычайных ситуаций глубинного происхождения в зонах развития газогидратов на акватории СМП [Petrova et al., 2022a]. Учет флюидодинамического влияния на ледовый режим дает возможность оптимизировать расположение безопасных транспортно-логистических трасс круглогодичного судоходства.

Спутниковая информация имеет важное прикладное значение для оперативного мониторинга мест появления газовых сипов на Арктическом шельфе. В настоящей работе представлены результаты изучения глубинного строения литосферы морей Российской Арктики в районах с высоким уровнем газонасыщенности придонных отложений, где газ может находиться как в свободном, так и в гидратном состояниях [Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Wallmann et al., 2018; Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023; Соколов и др., 2023; Богоявленский и др., 2022; Бондур и Кузнецова, 2015; Богоявленский и др., 2021а; Богоявленский и др., 2023].

В результате интерпретации магнитных аномалий и аномалий силы тяжести в Баренцевом, Восточно-Сибирском и Чукотском морях и в море Лаптевых выявлены газовыводящие пути выбросов метана. Газовые потоки, выходящие через

сквозные талики, имеют эндогенный генезис и приурочены к дизъюнктивным нарушениям. В зонах выхода субвертикальных глубинных разломов, где проходит циркуляция глубинных флюидов, возможен повышенный геотермальный поток.

Активизация газовых сипов (факелов) может создавать мощный подток глубинного термогенного газа по разломам и системам субвертикальных трещин, что способствуют расширению сквозных таликов и образованию крупных ареалов талых вод. Размеры факела зависят от того, с какой глубины и под каким пластовым давлением поступает газ, что отражается в траектории термофлюидного канала.

Попадая на нижнюю границу морского льда метан подвергается интенсивному окислению с выделением тепла. Это приводит к изменению реологических и прочностных характеристик льда, вызывая ускорение процессов образования трещин, полыней и разводий.

В юго-восточной части Баренцева моря наблюдается заприпайная Печорская полынья, к северо-западу от Новой Земли регулярно образуется Западно-Новоземельская полынья, в Карском море выделяются Амдерминская, Ямальская, Обь-Енисейская и Западно-Североземельская полыньи. В море Лаптевых образуется система заприпайных полыней: Восточно-Североземельская, Таймырская, Ленская и Новосибирская. Последняя расположена к северу от Новосибирских островов, занимая в некоторые годы огромные площади двух морей – Лаптевых и Восточно-Сибирского [Атлас..., 2019].

В настоящей работе для выяснения причин образования Великой Сибирской полыньи [Атлас..., 2019] построены петрофизические разрезы и проведено исследование ее литосферы. Эта полынья представляет собой непрерывную линию открытой воды и молодых льдов, которые систематически образуются за внешней кромкой припая на участке акватории от о-ва Большой Бегичев в море Лаптевых до Медвежьих о-вов в Восточно-Сибирском море.

Анализ магнитных и плотностных разрезов литосферы зон активизации газовых факелов демонстрирует особенности траекторий термофлюидных каналов, районы их выходов к поверхности дна, глубину и местоположение линз флюидных систем, что позволяет сделать прогноз потенциально опасных зон глубинного происхождения, обусловленных перемещением потоков флюидов.

2. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе арктического шельфа России накоплен значительный опыт выявления и картирования опасных геологических объектов гидроакустическими методами. Концентрации метана в атмосфере Арктики самые высокие на планете. Газовые факелы – эманации газа в виде всплывающих со дна пузырьков, образующих в водной толще устойчивые области повышенной концентрации. Газовые факелы зарегистрированы во многих районах Мирового океана, в том числе на арктическом шельфе [Сергиенко и др., 2012].

В работах [Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Wallmann et al., 2018; Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023; Соколов и др., 2023; Богоявленский и др., 2022; Бондур и Кузнецова, 2015; Богоявленский и др., 2021а; Богоявленский и др., 2023; Сергиенко и др., 2012; Матвеева и др., 2017] описываются эмиссия газов в водную толщу (газовые факелы) и газовые скопления. Выявление опасных геологических объектов выполняется в основном акустическими и сейсмоакустическими аппаратурными средствами. По результатам исследований опубликованы карты опасных явлений на неравномерной сетке маршрутов по наблюдениям в Баренцевом море [Соколов и др., 2023]. Дальнейшее систематическое изучение верхней части геологической среды шельфовых акваторий, в особенности на участках транспортно-логистических маршрутов, приведет к увеличению полноты информации для безопасного судоходства.

Влияние флюидодинамического фактора в акватории Арктического шельфа рассмотрено на примере районов с высоким уровнем газонасыщенности придонных отложений в Баренцевом, Восточно-Сибирском и Чукотском морях и в море Лаптевых (рис. 1).

В восточной части Северного Ледовитого океана существует по меньшей мере два района с основными восходящими потоками газа к морскому дну. Один простирается на 630 км вдоль шельфа и склона к западу от Шпицбергена [Serov et al., 2023]; второй встречается на шельфе моря Лаптевых [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]. Крупномасштабное картографирование региона показало, что широко распространенная утечка (возможно, тысяча мест выброса газовых пузырьков) в основном связана с зоной глубинного разлома. На данный момент высказана идея, что разломы представляют собой пути миграции газа из глубоких коллекторов.

2.1. Баренцево море

Газовые гидраты не были основным источником метана в океанах, а скорее действовали как динамическое уплотнение, регулирующее высвобождение метана из глубоких геологических резервуаров. Авторы [Wallmann et al., 2018] предполагают миграцию флюидов по структурным каналам, созданным разломами.

В северной части Баренцева моря по данным акустических исследований была обнаружена серия корневых звукорассеивающих объектов с шириной около дна до 250 м (мега-факелы)

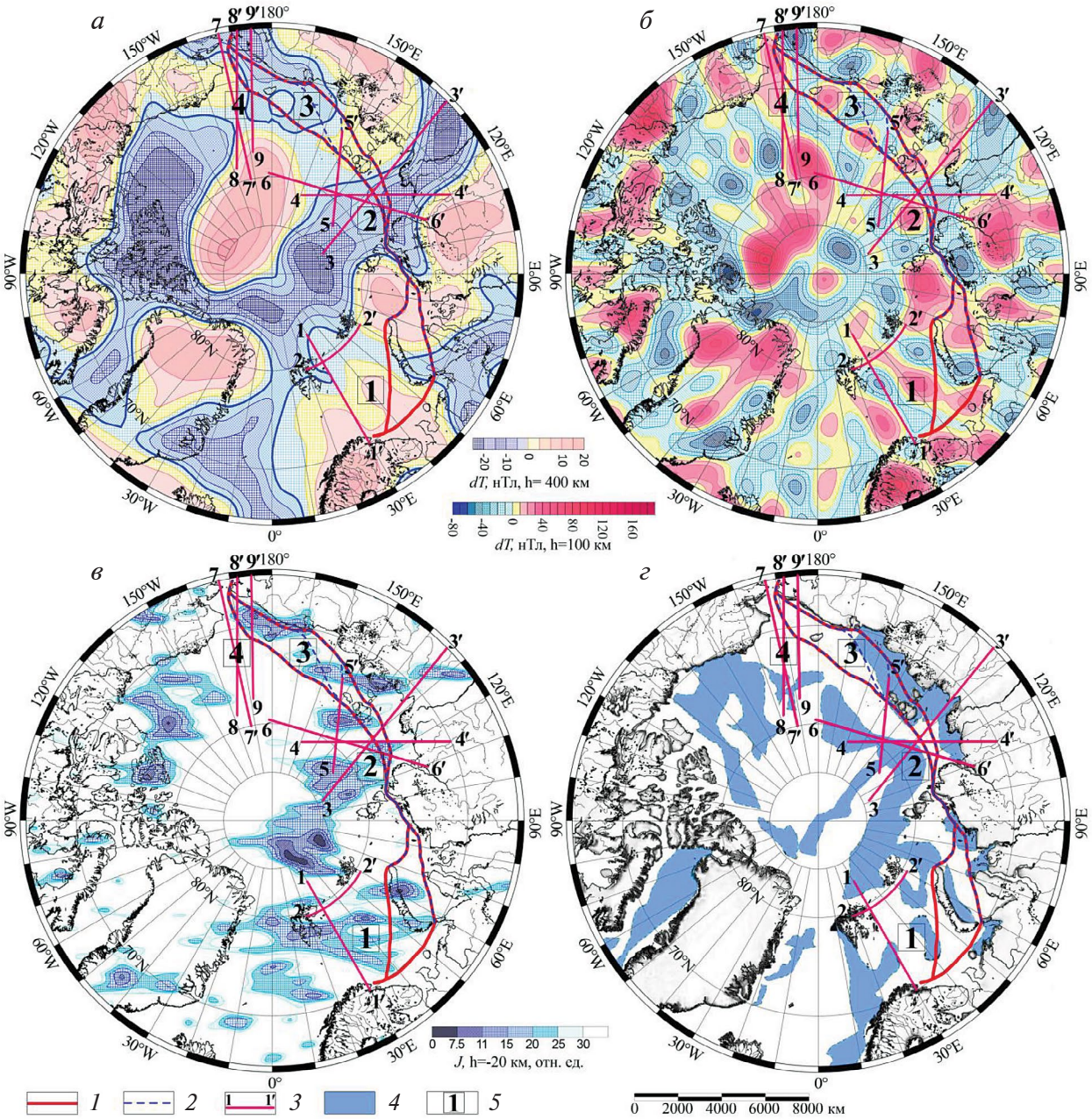

Рис. 1. Геофизические характеристики криолитозоны Арктического шельфа: аномалии модуля МПЗ (КА CHAMP) [Thebault et al., 2016]: (*а*) – *h* = 400 км; (*б*) – *h* = 100 км; (*в*) – намагниченность пород земной коры (глубина ~20 км); (*г*) – зоны газогидратов. *1* – СМТК; *2*– трассы СМП; *3* – положение петрофизических разрезов; *4* – газогидраты [Shakhova et al., 2019]; *5* – арктические моря: 1 – Баренцево море, 2 – море Лаптевых, 3 – Восточно-Сибирское море, 4 – Чукотское море.

и наличие каналов перемещения флюидов вверх по разрезу, которые могут быть связаны с глубинной разломной системой [Соколов и др., 2023]. Это делает вероятным разгрузку мигрирующих вверх флюидов по наклонным и проницаемым пластам. Пласты морских сланцев верхнего и среднего триаса могут сдерживать миграцию флюидов.

В составе углеводородного газа в осадках обнаруживается доля углеводородного газа C_2-C_5 (этан, пропан и др.), указывающая на термогенное происхождение газа. Наборы данных по всей центральной части Баренцева моря показывают более семи тысяч выходов углеводородного газа, содержащих термогенные источники углеводородов [Serov et al., 2023].

2.2. Море Лаптевых

В ряде работ [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Богоявленский и др., 2022; Сергиенко и др., 2012; Лобковский и др., 2015] исследованы причины активной эмиссии метана и опасные газонасыщенные объекты в акваториях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

В работах [Shakhova et al., 2019; Сергиенко и др., 2012] отражены наблюдения, в ходе которых были зафиксированы мощные многочисленные метановые сипы в диапазоне глубин 60–110 м. Ранее предполагалось, что в этом глубинном интервале происходит наиболее значительная деградация подводной мерзлоты, способствующая появлению сквозных путей вывода метана. На некоторых океанографических разрезах были обнаружены факелы диаметром более 100 м, которые сливались в один многокорневой гигантский факел диаметром более 1000 м.

В работе [Baranov et al., 2020] предложена идея о выбросах метана в системе разлом – газовый резервуар – таликовые зоны, связанные с недавними зонами разломов. Авторы предполагают, что метан мигрирует снизу по разломам к морскому дну и затем сбрасывается в океан. Толщина отложений на шельфе моря Лаптевых достигает 12 км, что потенциально может привести к образованию углеводородов. Глубинные разломы служат каналами миграции газа из нижних слоев отложений в верхние, где может образоваться газовый резервуар под зоной стабильности газовых гидратов и горизонтом вечной мерзлоты [Shakhova et al., 2015; Shakhova et al., 2019; Сергиенко и др., 2012].

Наличие газовых коллекторов/газовых карманов подтверждается анализом сейсмических данных, полученных на шельфе моря Лаптевых [Bogoyavlensky et al., 2018].

В центральной части моря Лаптевых была выявлена зона мощной эмиссии метана [Shakhova et al., 2010; Богоявленский и др., 2021a], где по данным исследований акустический фундамент залегает на глубине 11–14 км [Богоявленский и др., 2023]. В результате комплексного анализа впервые показана приуроченность сипов газа в данном районе к глубинным разломам, а сипы обуславливают прямую миграцию газа с большой глубины.

В работе [Богоявленский и др., 2021a] подтверждается хорошо известный факт возможной миграции газа вверх по системам активных разломов. В исследованиях продемонстрирована приуроченность сипов к глубинным каналам перемещения газа и доказано, что многочисленные тектонические нарушения и значительные объемы углеводородов термогенного происхождения являются основной причиной высвобождения газа на краю шельфа моря Лаптевых.

Результаты исследований изотопного состава углерода метана $\delta^{13}C$ (CH_4) сипов газа в акватории Восточной Арктики почти повсеместно подтвердили его глубинное происхождение [Baranov et al., 2020; Богоявленский и др., 2021a]. В подавляющем большинстве исследований моря Лаптевых в придонных осадках и сипах был обнаружен термогенный метан с $\delta^{13}C$ (CH_4), а также более тяжелые молекулярные соединения (этан, пропан и др.). Это свидетельствует о долговременном перемещении глубинного газа по системам активных разломов и субвертикальных трещин в атмосферу.

Исследования сипов газа, углеродного состава метана совместно с данными сейсморазведки и измерений придонных температур воды обосновали согласованность местоположений газовых сипов в центральной части моря Лаптевых и глубинных разломов [Богоявленский и др., 2021a].

В работе [Богоявленский и др., 2023] доказано, что на шельфе моря Лаптевых выявленные в зоне наличия мерзлых пород сквозные талики имеют эндогенное происхождение и связаны с крупным разрывным нарушениям сплошности пород. Сейсмичность центральной части моря Лаптевых является наиболее интенсивной, она приводит к повышению проницаемости таликов, активизируя вертикальное перемещение потоков флюидов и вызывая разрушение мерзлоты и распад газогидратов [Bogoyavlensky et al., 2018].

Высокая активность процессов дегазации подтверждается многочисленными газопроявлениями, приуроченными к террасовидным субгоризонтальным поверхностям, разбитым современными тектоническими нарушениями. По результатам геофизических работ АО "Морская арктическая геологоразведочная экспедиция" методом общей глубинной точки (МОГТ) определены множественные очаги газонасыщения осадочных пород в верхней части разреза (ВЧР) на глубинах более 50–60 м, также часто приуроченные к тектоническим разломам [Богоявленский и др., 2023].

В восточной части моря Лаптевых широкой полосой проходит система рифтогенных грабенов, которая значительно превышает ширину рифтовой зоны хребта Гаккеля. В работе [Лобковский и др., 2015] предполагается, что миграция метана в толще осадочных пород и его последующее выделение могут быть связаны с новейшими разломами, которые берут начало от более древних дизъюнктивных структур с глубинными корнями.

2.3. Восточно-Сибирское море

Восточно-Сибирское море является шельфовым морем Северного Ледовитого океана и находится у берегов Восточной Сибири.

В работе [Богоявленский и др., 2022] исследованы опасные газонасыщенные объекты в Восточно-Сибирском море, где, в отличие от моря Лаптевых, отсутствует активное проявление сейсмичности, и количество живых разломов ощутимо меньше. Так, сипы газа были обнаружены в центральной части Восточно-Сибирского моря.

Аномальные объекты в придонных отложениях, которые предположительно связаны с залежами газа и каналами его субвертикальной миграции, выявлены при интерпретации ВЧР МОГТ в северо-западной части Восточно-Сибирского моря. Тектонически экранированные залежи газа на глубинах 300–800 м от дна приурочены к разрывным нарушениям, идущим от акустического фундамента [Богоявленский и др., 2022].

2.4. Чукотское море

В отличие от других шельфовых морей Северной Евразии западная и восточная границы Чукотского моря носят условный характер и проходят по меридианам о. Врангеля (180°) и 155–156° западной долготы в районе мыса Барроу на Аляске [Богоявленский и Кишанков, 2020].

В Чукотском море сейсмичность фиксируется в районе Берингова пролива и напротив побережья Аляски с глубинами очагов землетрясений от 0 до 40 км.

Большая часть акватории Чукотского моря (70% площади) характеризуется толщиной отложений более 2 км: Южно-Чукотский бассейн имеет мощность осадочных отложений 2–4 км, в Северо-Чукотском бассейне максимум мощности осадочного чехла достигает 22 км. Таким образом, мощность осадочного чехла достаточна, чтобы обеспечить благоприятные условия для газообразования и, следовательно, для образования газогидратов. Придонные осадочные породы, сформировавшиеся в Чукотском море, обогащены органическим веществом, что является следствием особых геодинамических условий: достаточно длительным растяжением земной коры с формированием системы прогибов и современной флюидной активностью.

Значительная мощность осадочного чехла и высокий углеводородный потенциал Чукотского моря позволяют прогнозировать образование термогенных газов (в том числе гомологов метана) и их последующую миграцию к морскому дну через ослабленные зоны и разломы. Содержание гомологов метана в отложениях Чукотского моря колеблется в широких пределах [Матвеева и др., 2017].

Потенциальное количество газа, хранящегося под Чукотским морем в виде гидратов, оценивается на основе картирования зоны их устойчивости [Матвеева и др., 2017].

В работе [Богоявленский и Кишанков, 2020] на основе данных сейсморазведки приводятся результаты изучения потенциальной газоносности Чукотского моря. В исследовании были установлены группы потенциальных залежей газа, распределенные по вертикали, а также выделены разломы, по которым происходит миграция из глубоких горизонтов. В большинстве случаев глубинное происхождение метана в придонных отложениях подтверждается наличием его гомологов.

Наличие структурных каналов для притока флюидов к поверхности в виде разломов способствует вкладу струйного эффекта дегазации. Предполагаются коренные породы с коллекторскими свойствами и последующее проявление дегазации.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью изучения специфики глубинного строения регионов с повышенной газонасыщенностью проведен анализ магнитных и плотностных свойств литосферы в Арктических морях. В качестве исходных данных использованы магнитные аномалии модуля МПЗ [Копытенко и Петрова, 2016; Копытенко и Петрова, 2020] и аномалии

силы тяжести [Bonvalot et al., 2012]. По магнитным аномалиям и аномалиям силы тяжести были вычислены глубинные магнитные и плотностные разрезы по профилям, пересекающим районы проявления метановых сипов и газовых факелов (рис. 1). На обзорном рисунке (рис. 1) приведено местоположение профилей, для которых выполнены расчеты петрофизических разрезов через подтвержденные участки газонасыщенных объектов, метановых сипов и газовых гидратов [Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Wallmann et al., 2018; Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023; Соколов и др., 2023; Богоявленский и др., 2022; Бондур и Кузнецова, 2015; Богоявленский и др., 2021а; Богоявленский и др., 2023].

Методика построения глубинных разрезов земной коры основана на спектрально-пространственном представлении аномальных геофизических полей, которые конвертируются в магнитные и плотностные разрезы посредством последовательной линейной фильтрации спектра исходного поля с последующим обратным преобразованием полученного набора спектров в интересующем диапазоне периодов аномалий. Петрофизические разрезы рассчитаны по магнитным аномалиям и аномалиям поля силы тяжести методом спектрально-пространственного анализа (СПАН). Методика применения СПАН для формирования магнитной и плотностной модели глубинных разрезов изложена авторами в ряде статей [Петрова и Копытенко, 2019].

Результаты СПАН, полученные на основе данных высокоточных магнитных съемок, применялись для решения нефтегазопоисковых задач на территории России и в акваториях Северного, Баренцева, Берингова и Средиземного морей. При построении петрофизических разрезов методом СПАН учитывалась экспериментально-теоретическая зависимость параметров спектральной структуры магнитного поля от глубины залегания магнитоактивных тел. Такой подход позволяет оценить мощность и глубину залегания комплексов, отличающихся по физическим свойствам, и определить глубины залегания объектов с погрешностью 5–10%.

Сопоставление рассчитанных методом СПАН плотностных разрезов с сейсмическими разрезами позволило определить маркирующие горизонты сред с разными скоростными характеристиками, соотнести их с местоположением литолого-стратиграфических комплексов в геологическом разрезе и провести идентификацию выделяемых поверхностей. Ослабленные слои с пониженными магнитными и плотностными свойствами на разрезах соответствуют зонам инверсий сейсмических скоростей. Выполненные по разрезам СПАН расчеты глубин были неоднократно подтверждены бурением в нефтегазоносных районах (более 100 скважин) [Петрова и Копытенко, 2019].

Спектрально-пространственное представление высокоточных магнитометрических измерений позволяет представить вертикальные объекты слабомагнитных разностей, прослеживающиеся с глубины в несколько километров до поверхности в комплексах осадочного чехла и фундамента. На плотностных и магнитных разрезах зонами пониженной плотности и намагниченности отражаются линзы флюидных систем, зоны рассланцевания земной коры, латеральные и вертикальные разломы, которые являются путями миграции термофлюидных потоков.

Глубинные разрезы наглядно представляют местоположение флюидных систем земной коры и мантии. По магнитным разрезам можно получить оценку намагниченности пород, по плотностным разрезам – оценку плотности пород земной коры и мантии. По петрофизическим разрезам определяется местоположение линз флюидных систем и каналов термофлюидной проработки. Следы миграции минерализованных потоков флюидов проявляются на разрезах в виде слабомагнитных подводящих каналов пониженной плотности. В низах коры и мантии, где из-за высоких температур (более 560°C) породы находятся в размагниченном состоянии, местоположение флюидных систем определяется по плотностным разрезам [Petrova et al., 2019]. Совместный анализ спутникового мониторинга ледяного покрова с глубинными разрезами, пересекающими крупные ареалы талых вод и сквозные талики, показал, что одним из основных эндогенных факторов таяния является флюидный поток, поднимающийся по субвертикальным каналам и имеющий подпитку из глубокофокусных линз флюидных систем на разных глубинных уровнях залегания земной коры.

Специфические особенности земной коры в районах с повышенной газонасыщенностью придонных отложений представлены на глубинных петрофизических разрезах, построенных через поля выделения метана Баренцева моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей (рис. 2–5).

Для исследования глубинного строения земной коры районов выделения метана были решены следующие задачи:

– проведен анализ расположения зон проявления выбросов метана в Арктических морях [Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015;

Bogoyavlensky et al., 2018; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Wallmann et al., 2018; Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023; Соколов и др., 2023; Богоявленский и др., 2022; Бондур и Кузнецова, 2015; Богоявленский и др., 2021а; Богоявленский и др., 2023];

– построены плотностные и магнитные разрезы земной коры для подтвержденных участков в полях выделения метана;

– по петромагнитным разрезам выявлены разломные зоны глубинного заложения и местоположение линз флюидонасыщенных слоев в земной коре и мантии;

– определены траектории, глубина и выходы потоков флюидов по термоактивным каналам к областям проявления метановых сипов и газовых факелов;

– по спутниковым измерениям МПЗ и площадным расчетам ослабленных зон земной коры на глубинах около 20 км в рассмотренных акваториях выделены наиболее вероятные районы возможного влияния эндогенного флюидодинамического фактора.

Флюидопроводящие каналы представляют собой ослабленные зоны с низкой намагниченностью, пониженными плотностными свойствами и могут иметь повышенные значения теплового потока. Линзы флюидных систем характеризуются инверсией сейсмических скоростей и пониженным электрическим сопротивлением [Шипилов, 2016]. На разрезах каналы термофлюидной проработки и линзы флюидных слоев визуализируются в виде зон пониженной плотности и намагниченности в низах земной коры и мантии.

Выявление местоположения выходов термофлюидных каналов к поверхности морского дна позволяет предопределить наиболее вероятное распределение устойчивых ареалов талых вод, возникающих под влиянием флюидодинамического фактора земной коры и мантии.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе интерпретации аномалий магнитного поля Земли и аномалий силы тяжести исследовано строение литосферы Арктических морей в районах повышенной газонасыщенности придонных отложений. В работе исследована специфика строения литосферы в районах потенциальных и зафиксированных полей выделения метана в Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях (рис. 1) [Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Bogoyavlensky et al., 2018; Shakhova et al., 2019; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Wallmann et al., 2018; Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023; Соколов и др., 2023; Богоявленский и др., 2022; Бондур и Кузнецова, 2015; Богоявленский и др., 2021а; Богоявленский и др., 2023; Сергиенко и др., 2012; Матвеева и др., 2017; Лобковский и др., 2015]. Анализ петрофизических разрезов показал, что каналами поставки флюидов эндогенного происхождения в районы повышенной газонасыщенности могут служить субвертикальные термофлюидные каналы разломов глубинного заложения. Для Баренцева, Восточно-Сибирского и Чукотского морей и моря Лаптевых построены петрофизические разрезы (рис. 2–5), на которых отражаются наиболее вероятные глубины и пути подтока миграции газовых флюидов в случае активизации флюидонасыщенных линз, например, под влиянием сейсмических событий.

Исследования арктического шельфа России показывают, что риски возникновения чрезвычайных ситуаций могут быть связаны с высоким уровнем газонасыщенности придонных осадков, содержащих газ как в гидратном, так и в свободном состояниях [Богоявленский и Богоявленский, 2021].

4.1. Баренцево море

По данным геофизических и геохимических исследований в Баренцевом море подтверждены зоны развития газогидратов [Andreassen et al., 2020], выход газовых факелов, в том числе мегафакелов, и метана глубинного генезиса [Соколов и др., 2023]. Петрофизические разрезы по профилям 1–1’ и 2–2’ (рис. 1–2) пересекли горизонты газогидратов и ареалы проявлений газовых факелов.

На подоснове плотностного разреза профиля 1–1’ (рис. 2*а*) представлены аномалии магнитного поля, полученные по измерениям спутника CHAMP для высоты 100 км [Thebault et al., 2016]. Минимум магнитного поля в зоне газогидратов отвечает присутствию в этом районе Баренцева моря ослабленных слоев пониженной намагниченности и плотности, проявляющихся на глубине около 20 км в земной коре и на глубине больше 45 км в мантии (рис. 2*а–б*). Значительная вертикальная зона термофлюидной проработки под зоной газогидратов на профиле 1-1’ прослеживается на плотностном и еще более ярко на магнитном разрезе с глубины 25–30 км (рис. 2*а–б*). Восходящая вертикальная миграция флюидов по термофлюидному каналу с глубины более 20 км обеспечивает возможность внезапного выведения термального потока к поверхности в ареал твердых газогидратов. Это может создавать ус-

ловия для возникновения в ареале газогидратов взрывоопасного природного явления глубинного происхождения.

Зона мега-факелов на профиле 1–1’ расположена в Баренцевоморской магматической провинции [Шипилов, 2016]. На плотностном и магнитном разрезе видна возможная траектория субвертикальной подпитки мега-факелов с глубины более 15 км (рис. 2*а–б*).

Зона мега-факелов на профиле 2–2’ может подпитываться с глубины 10–15 км (рис. 2*г*). Мощный подток термогенного газа идет по раз-

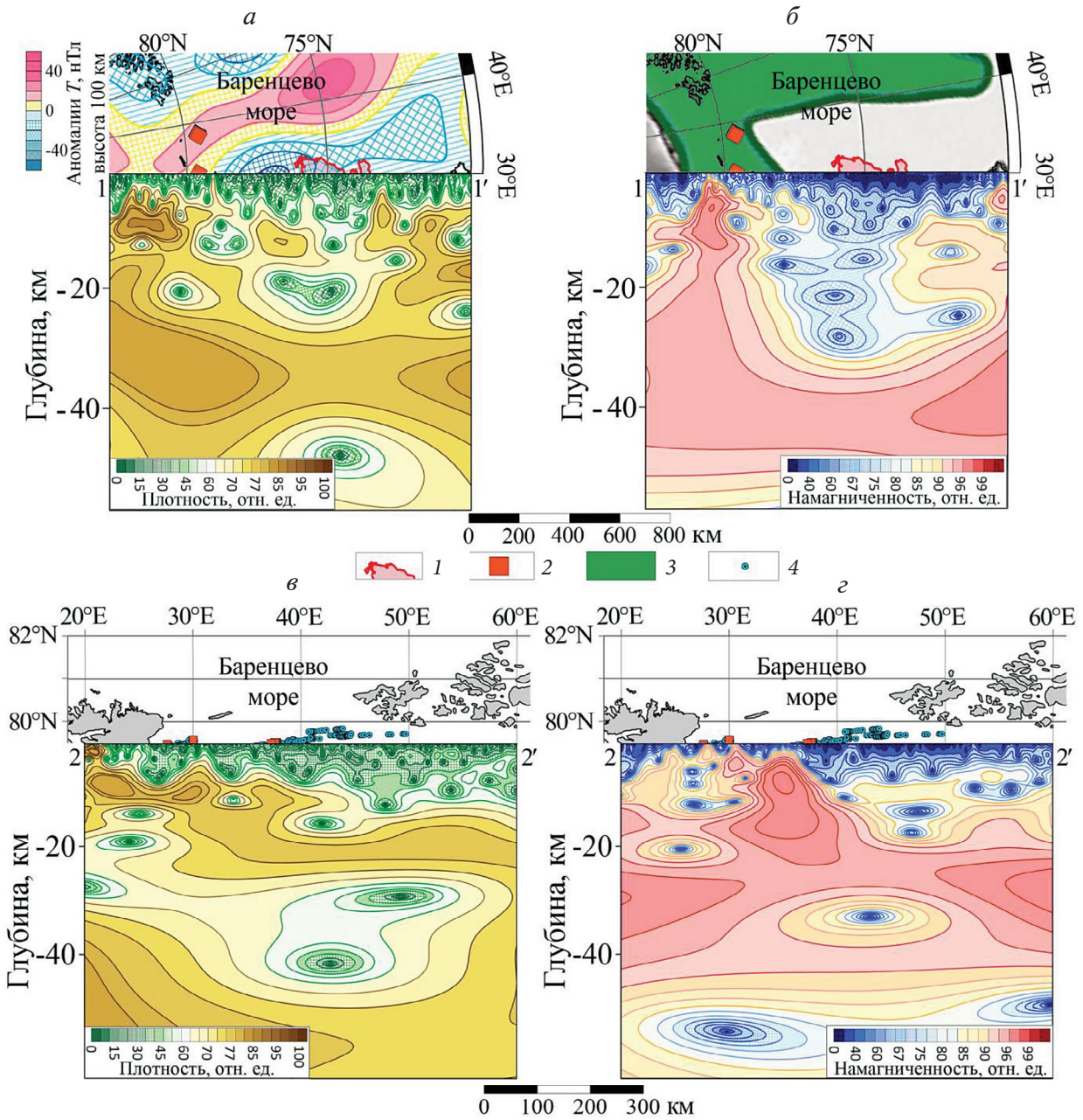

Рис. 2. Разрезы литосферы Баренцева моря в зонах развития газогидратов и газовых факелов: (*а*) – плотностной разрез (пр. 1-1’), подоснова – магнитные аномалии модуля МПЗ (h = 100 км) [Thebault et al., 2016]; (*б*) – магнитный разрез (пр. 1-1’), подоснова – Баренцевоморская магматическая провинция [Шипилов, 2016]; (*в*) – плотностной разрез (пр. 2-2’), (*г*) – магнитный разрез (пр. 2-2’). *1* – Ареал твердых гидратов [Andreassen et al., 2020; Serov et al., 2023]; *2* – мега-факелы; *3* – Баренцевоморская магматическая провинция; *4* – газовые факелы [Соколов и др., 2023]; *5* – Баренцево море.

ломам и системам субвертикальных трещин. Зафиксированное обширное поле выделения метана в зоне факелов [Богоявленский и др., 2022] на профиле 2–2’ находится над крупной сложнопостроенной зоной нарушений, где метан может поступать в породы ВЧР земной коры с глубин 10–15 км. На профиле 1–1’ на участке мега-факела возможна миграция метана глубинного генезиса из глубоких геологических резервуаров по субвертикальной траектории с глубины около 30 км. Зоны разломов под мега-факелами формируют области концентрированной разгрузки, через которые может происходить мощная эмиссия газа.

4.2. Море Лаптевых

По данным геофизических и геохимических исследований в море Лаптевых обнаружены мощные поля выделения метана в виде факелов с шириной газовых вспышек до 100–150 м, и слившихся фонтанов в многокорневой гигантский факел диаметром более 1000 м [Shakhova et al., 2019]. Петрофизические разрезы по профилям 3–3’ и 4–4’ (рис. 1, 3) пересекли поля выделения метана в виде газовых сипов, зафиксированных вблизи СМТК.

На плотностных разрезах 3–3’ и 4–4’ (рис. 3*а–в*) продемонстрирована разломная зона, по которой

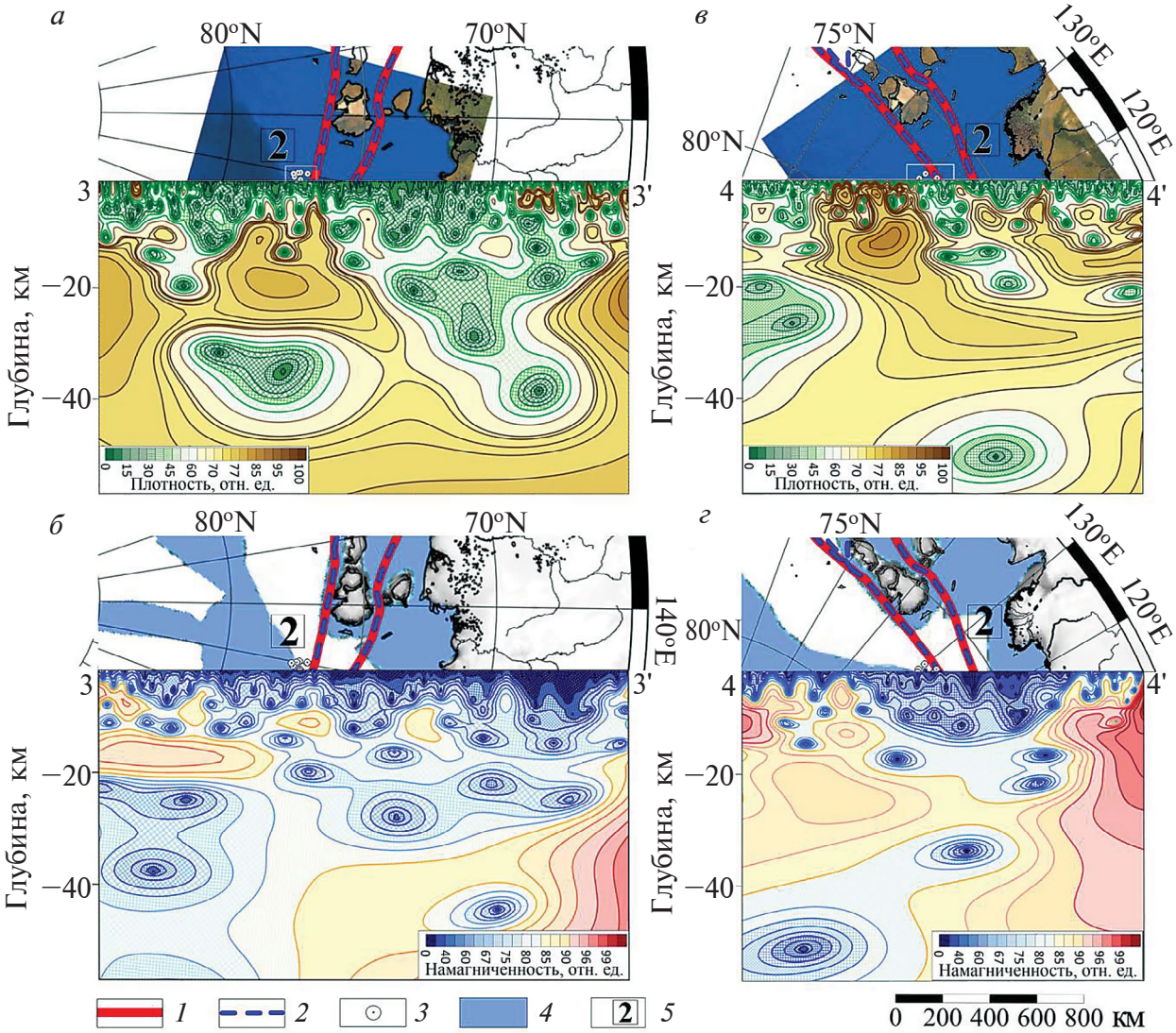

Рис. 3. Разрезы литосферы моря Лаптевых в зонах развития газогидратов и газовых факелов: (*а*) – плотностной разрез (пр. 3-3’), (*б*) – магнитный разрез (пр. 3-3’); (*в*) – плотностной разрез (пр. 4-4’), (*г*) – магнитный разрез (пр. 4-4’). *1* – СМТК; *2* – СМП; *3* – метановые сипы [Baranov et al, 2020; Shakhova et al., 2015; Богоявленский и Богоявленский, 2021; Сергиенко и др., 2012]; *4* – газогидраты [Shakhova et al., 2019].

проходит траектория субвертикальной миграции флюидов, что дает возможность выведения термального потока к поверхности с глубины 20–30 км в область полей выделения метана в виде газовых сипов вблизи СМТК.

На магнитном разрезе 3–3’ (рис. 3*б*) хорошо выражена восходящая субвертикальная траектория возможной миграции флюидов по терморазлому к зоне газовых сипов с глубины около 30 км, которая может быть причиной активной эмиссии газа на этом участке и вызывать интенсивный пузырьковый выброс метана. На магнитном разрезе 4–4’ (рис. 3*г*) миграция флюида возможна с глубины 10–12 км.

На подоснове магнитных разрезов 3–3’ и 4–4’ (рис. 3*б–г*) приведены зоны потенциального развития газогидратов вблизи акватории СМП [Shakhova et al., 2019]. В зоны газогидратов возможен выход термального потока из земной коры по наклонным разломам с глубины около 10–15 км.

Термальные потоки глубинного флюида способствуют ускорению таяния ледяного покрова. В работе [Богоявленский и др., 2023] отмечается, что одно из крупных разрывных нарушений пород дна к северу от острова Бегичев (рис. 4*б*), “точно совпадает с талой зоной, выделенной при анализе преломленных волн по сейсмопрофилю PT1101”. Петрофизические разрезы 3–3’ и 4–4’ (рис. 3), а также 6–6’ (рис. 4*б*) пересекают Великую Сибирскую полынью на участке от о-ва Большой Бегичев в море Лаптевых до Медвежьих о-вов в Восточно-Сибирском море [Атлас..., 2019]. На магнитных разрезах 3–3’ и 4–4’ (рис. 3) видно, что полынья расположена над зоной субвертикальных термоактивных разломов, доходящих до глубины 15 км с возможностью подтока при повышении сейсмической активности с глубины больше 20 км.

Полученные в настоящей работе результаты исследований арктического шельфа России впервые позволили оценить специфику литосферы районов с высоким уровнем газонасыщенности в виде газовых факелов, мега-факелов, горизонтов газогидратов и сделать прогноз появления рисков для судоходства в Баренцевом море, море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях.

4.3. Восточно-Сибирское море

По сейсмическим данным в Восточно-Сибирском море выявлено относительно равномерное распределение потенциальных газонасыщенных объектов [Богоявленский и др., 2022]. В северо-западной части Восточно-Сибирского моря обнаружены аномальные объекты в придонных отложениях, предположительно связанные с залежами свободного газа и каналами его субвертикальной миграции. По сейсмическим данным зафиксированы потенциальные каналы миграции газа, подходящие близко к морскому дну.

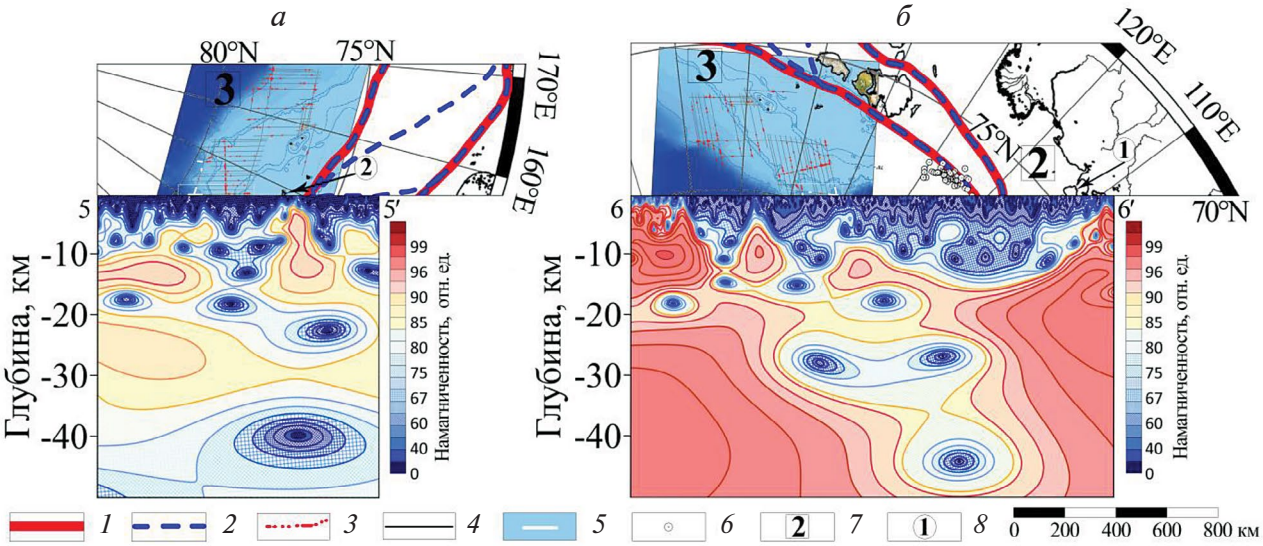

Рис. 4. Разрезы литосферы Восточно-Сибирского моря и море Лаптевых в зонах прогнозируемых газонасыщенных объектов, газовых гидратов и метановых сипов: (*а*) – магнитный разрез (пр. 5-5’), (*б*) – магнитный разрез (пр. 6-6’). *1* – СМТК; *2* – СМП; *3* – прогнозируемые газовые залежи; *4* – сейсмические профили; *5* – прогнозируемые залежи газовых гидратов [Богоявленский и др., 2022]; *6* – метановые сипы [Богоявленский и Богоявленский, 2021]; *7* – моря: 2 – море Лаптевых, 3 – Восточно-Сибирское море; *8* – острова: 1 – о. Большой Бегичев, 2 – о. Беннета.

В работе [Богоявленский и др., 2022] показано, что тектонически экранированные залежи газа приурочены к разрывным нарушениям, идущим от акустического фундамента. Предположительно выявлен сейсмический отражающий горизонт, отождествляемый с наличием газогидратов.

Авторами настоящей работы через выявленные зоны потенциальных газонасыщенных объектов Восточно-Сибирского моря [Богоявленский и др., 2022] построены два петрофизических разреза: по профилям 5 и 6 (рис. 1, рис. 4*а–б*).

Магнитный разрез по профилю 5–5’ сечет вкрест простирания линейную зону прогнозируемых газовых залежей и проходит через горизонт, отождествляемый с наличием газогидратов (рис. 4*а*). К горизонту газогидратов выходит неглубокий разлом с глубины около 4 км.

Магнитный разрез по профилю 6–6’ (рис. 4*б*) пересекает этот же горизонт газогидратов под другим углом. При таком сечении видно, что к горизонту газогидратов выходит разломная зона, прослеживающаяся до глубины 4 км. Термальный поток с глубины 15–18 км возможен только по наклонной разломной зоне в виде непрямого бокового подтока.

Под областью прогнозируемых газовых залежей проявляется канал вертикальной миграции флюидов по разломной зоне, доходящей до глубины 8 км (рис. 4*а*).

Однако ниже на разрезе ярко выражена вертикальная зона миграции флюидов из линз флюидной системы на глубинах 10–15 км и 20 км (рис. 4*а*). Такой вертикальный канал создает условия для внезапного выведения мощного термального потока к поверхности дна с глубины более 20 км и из мантии с глубины более 40 км в акваторию острова Беннетта (рис. 4*а*). По всей видимости, обнаруженный здесь феномен плюма в виде гигантского на сотни километров в длину и 10–25 км в ширину шлейфа метана был создан этим термоактивным разломом глубинного заложения в результате высвобождения метана из глубоких геологических резервуаров [Богоявленский и др., 2022]. Это создает условия для таяния ледяного покрова, эмиссии термогенного метана и возникновения взрывоопасных природных явлений эндогенного происхождения.

Южная часть разреза по профилю 6–6’ выходит в море Лаптевых, где пересекает регулярно образующуюся за внешней кромкой припая Великую Сибирскую полынью [Атлас..., 2019] на участке около 115° Е. Из магнитного разреза по профилю 6–6’ следует, что к большой полынье выходит мощная широкая зона геотермального потока флюидов с глубины 10–13 км. Это создает условия для таяния ледяного покрова и формирования устойчивой полосы открытой воды.

4.4. Чукотское море

По результатам изучения потенциальной газоносности ВЧР Чукотского моря на основе данных сейсморазведки через выявленные аномальные потенциально газонасыщенные объекты построены три петрофизических разреза по профилям 7–7’, 8–8’ и 9–9’ (рис. 1, рис. 5*а–в*), пересекающих зоны прогнозируемых газовых залежей [Bogoyavlensky et al., 2018; Богоявленский и Кишанков, 2020].

На всех разрезах на участках прогнозируемых газовых залежей выделены каналы миграции из глубоких горизонтов земной коры. Глубинный генезис газа подтвержден наличием гомологов метана [Bogoyavlensky et al., 2018].

На профиле 7–7’ (рис. 1, рис. 5*а*) к прогнозируемым участкам выходит разломная зона с глубины более 20 км и вертикальный канал с 10 км. Сложная картина переслаивания пород с различными магнитными свойствами с глубиной – слабомагнитных линз с перекрывающими слоями типа флюидоупоров – внутри разломной зоны может свидетельствовать о том, что коренные породы выделенных участков потенциально обладают коллекторскими свойствами.

На профиле 8–8’ (рис. 1, рис. 5*б*) в северной части площади сейсмических работ к прогнозируемым участкам газовых залежей выходит субвертикальный канал с глубины около 10 км. В южной части работ выделена мощная разломная зона, прослеживающаяся из мантии, проходящая через всю земную кору с выходом в породы ВЧР. Флюидонасыщенные слои проявляются в земной коре на глубинах около 5 км и 15 км.

На профиле 9–9’ (рис. 1, рис. 5*в*) в северной части площади сейсмических работ к прогнозируемым участкам газовых залежей с глубины около 10–15 км выходит субвертикальный геотермальный канал.

На разрезах 8–8’ и 9–9’ выявлена большая мощность осадочного чехла Чукотского моря, предположительно с хорошими коллекторскими свойствами.

Анализ петрофизических разрезов позволяет прогнозировать в Чукотском море проявление и миграцию термогенных газов в породы ВЧР через разломные зоны. Наличие структурных каналов в виде разломов может способствовать притоку флюидов к поверхности с возможным вкладом струйного эффекта дегазации [Матвеева и др., 2017].

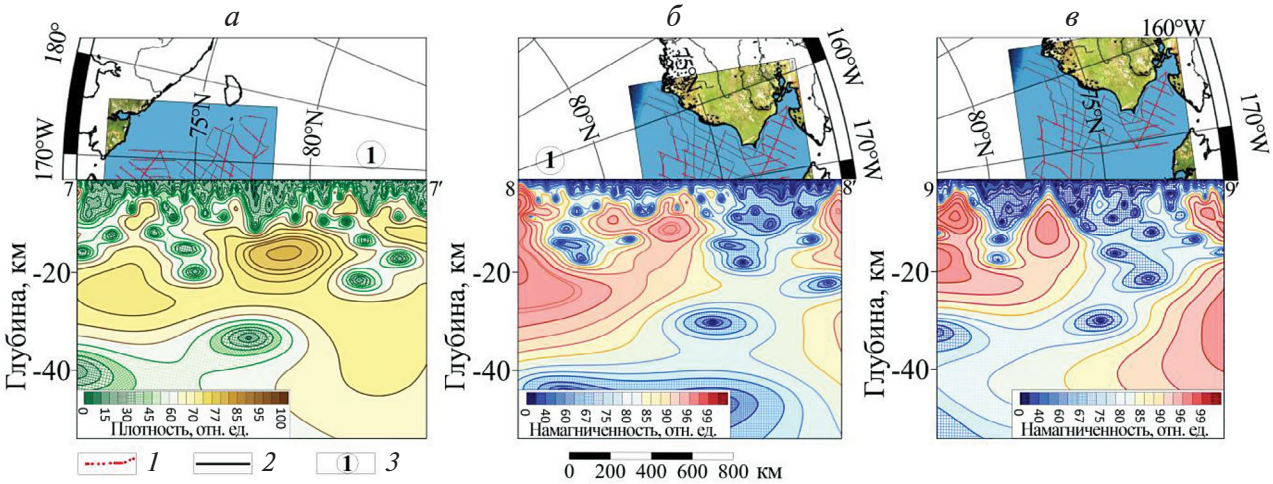

Рис. 5. Разрезы литосферы Чукотского моря в зонах прогнозируемых газовых залежей. *1* – прогнозируемые газовые залежи [Богоявленский и Богоявленский, 2021], *2* – сейсмические профили МОГТ; *3* – Чукотское поднятие.

Результаты исследований, проведенных авторами для морей Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского показали, что на некоторых участках СМТК могут возникать проблемы навигационной безопасности. Приповерхностные комплексы газогидратов, поля метановых сипов создают факторы повышенного риска, осложняющие мореплавание, эксплуатацию морских нефтегазовых месторождений и транспортировку углеводородного сырья на участках выходов потоков флюидов из низов земной коры и верхней мантии по вертикальным термоактивным разломам.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значительное ускорение сокращения площади арктических льдов связывают с глобальным потеплением климата. Но ледяной покров разрушается не только под влиянием внешних причин, но и под воздействием глубинного флюидодинамического фактора. Анализ спутниковых наблюдений за изменением толщины льда и визуализация траекторий флюидопотоков по термоактивным разломам на магнитных и плотностных разрезах позволяет прогнозировать и выявлять районы крупных талых ареалов, в том числе в акватории СМП. В результате исследования строения литосферы криолитозоны Арктического шельфа по аномалиям магнитного поля и аномалиям силы тяжести выдвинуто предположение о влиянии флюидного потока разломов глубинного заложения на формирование ледяного покрова за счет уменьшения толщины льдов из-за образования зон разводий и сквозных таликов.

Увеличение температуры и мощности флюидного потока влияет на процесс деградации льда. Возможность образования зон крупных проталин и полыней возникает при возрастании мощности флюидного потока до 100 мВт/м. Анализ петрофизических разрезов 3–3’ и 4–4’ (рис. 3) и 6–6’ (рис. 4*б*), пересекающих Великую Сибирскую полынью [Атлас..., 2019] в море Лаптевых, показал, что полынья расположена над субвертикальными термоактивными разломными зонами, доходящими до глубины 15 км с возможностью подтока при повышении сейсмической активности с глубины более 20 км.

Расположения флюидных линз земной коры и флюидных систем мантии влияют на пространственное распределение стабильных ареалов таяния льда. Местоположение флюидонасыщенных слоев в земной коре и в мантии наглядно представлено на картах магнитных аномалий, полученных для высот 100 и 400 км по данным спутника CHAMP [Thebault et al., 2016]. Линзы земной коры проявляются в виде зон отрицательных аномалий модуля МПЗ на высоте 100 км (рис. 1*б*), флюидные системы мантии – на высоте 400 км (рис. 1*а*) [Thebault et al., 2016]. На магнитных и плотностных разрезах флюидные слои земной коры в виде линз пониженной намагниченности и плотности наиболее часто проявляются в интервале глубин 20–30 км. По компонентным измерениям спутника CHAMP на высоте 400 км в отрицательных аномалиях модуля и вертикальной компоненты МПЗ отчетливо отображается положение крупных флюидных систем мантии в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях [Петрова и Латышева, 2023].

Районы выходов субвертикальных термоактивных каналов приурочены к минимумам литосферных магнитных аномалий, создаваемых флюидными линзами низов земной коры и верхней мантии. Магнитные измерения спутников с высоты полета 400 км в виде минимумов литосферных аномалий (рис. 2*б*) отражают положение флюидных систем мантии, выделяемых в Арктическом шельфе на глубинах больше 30 км. Анализ спутниковых измерений толщины льда показал, что к минимумам намагниченности пород низов земной коры и мантии приурочены наиболее вероятные зоны ускоренной деградации льда под действием флюидодинамического фактора [14–15]. Выходы каналов к морскому дну СМТК дают возможность прогноза локализации зон устойчивого таяния льда под направленным влиянием глубинного флюидодинамического фактора. Флюидные слои представляют собой ослабленные латеральные зоны пониженных сейсмических скоростей и плотности, слабой намагниченности и повышенной электропроводности.

Тектонические волны, которые возникают в литосфере в результате сильных сейсмических событий, могут вызывать пульсации линз флюидных слоев и являться одной из причин активизации флюидодинамических процессов разломных зон земной коры.

Анализ глубинных петрофизических разрезов земной коры и мантии позволяет выявить местоположение линз флюидонасыщенных слоев, а также траектории и выходы термоактивных разломов. По совокупности признаков флюидные слои идентифицируются как реологически ослабленные слои. По сейсмическим глубинным исследованиям ослабленные зоны земной коры представляют собой трещиноватые флюидонасыщенные среды, играющие важную роль в процессе транспорта флюида к поверхности [Павленкова, 2018].

Определение местоположений выходов термофлюидных каналов к морскому дну дает возможность лучше прогнозировать положение наиболее вероятных ареалов талых вод и тонкого льда, возникающих под влиянием флюидодинамического фактора земной коры и мантии.

Схема пространственного расположения флюидонасыщенных линз в земной коре Арктического шельфа на глубине около 20 км (рис. 1*в*) демонстрирует зоны наиболее вероятных проявлений влияния флюидодинамического фактора, и, как следствие, возможного появления полей повышенных концентраций метана в Арктических морях.

Глубокофокусные флюидные системы мантии выделены на плотностных разрезах на глубинах ~40–50 км и ~70–90 км. При наличии значительного сейсмического события эти флюидные системы могут выступать в качестве спускового механизма воздействия на восходящие по термоактивным каналам флюидные потоки с возникновением взрывоопасных явлений в газонасыщенных районах.

Исследования арктического шельфа России показывают, что с высоким уровнем газонасыщенности придонных отложений могут быть связаны риски возникновения чрезвычайных ситуаций в акватории СМП. Анализ петрофизических разрезов районов повышенной газонасыщенности выявил глубины перемещающихся по разломам флюидных потоков в область развития газогидратов, проявлений газовых факелов и мегафакелов. Это дает возможность сделать прогноз расположения опасных ареалов в акватории СМП. Такая информация позволит выбирать наиболее безопасные трассы мореплавания.

В настоящее время Восточно-Сибирский арктический шельф находится в центре активных исследований из-за выявления повышенных концентраций метана в атмосфере и гидросфере, зафиксированных в ходе многочисленных экспедиций на шельфах Арктических морей [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2010; Shakhova et al., 2015; Bogoyavlensky et al., 2018].

В работе исследована специфика строения литосферы в районах зафиксированных и потенциальных полей прогнозируемых газовых залежей и выделений метана в Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях.

На магнитных разрезах Баренцева моря хорошо отражены пути восходящего вертикального перемещения флюидов на участках газопроявлений “факельного типа”, которое указывает на возможность внезапного выведения термального потока к поверхности в область полей выделения метана. Обширное поле выделения метана в зоне факелов подпитывается с глубины 10–15 км.

На участке проявления мега-факелов возможна миграция метана глубинного генезиса из более глубоких геологических резервуаров по субвертикальной траектории с глубины около 30 км. Зоны разломов под мега-факелами формируют области фокусированной разгрузки, через которые возможны крупномасштабные выделения метана. К гигантскому шлейфу метана в прибрежной акватории острова Беннетта [Соколов и др., 2023] мощный термальный поток из мантии может выходить с глубины более 40 км (рис. 4*а*). Это способствует выбросу термогенного метана

и возникновению взрывоопасных природных явлений эндогенного происхождения.

В зоне развития газогидратов в Баренцевом море выделена вертикальная зона термофлюидной проработки под зоной газогидратов, которая четко прослеживается на плотностном и еще более ярко на магнитном разрезе с глубины 25–30 км. Это создает условия для разрушения газогидратов, выброса метана и возникновения взрывоопасных ситуаций.

Анализ петрофизических разрезов по профилям 3–3' и 4–4' в море Лаптевых позволил исследовать причину активизации мощных полей выделения метана в виде газовых сипов вблизи границы СМТК (рис. 3). На плотностных и магнитных разрезах хорошо выражена разломная зона, по которой проходит восходящая траектория субвертикальной миграции флюидов, что дает возможность выведения термального потока к поверхности с глубины 20–30 км в область полей выделения метана. На этом участке миграция флюидов по терморазлому с глубины 30 км может быть причиной активной эмиссии газа и способствовать интенсивному пузырьковому выбросу метана.

В Восточно-Сибирском море построены два петрофизических разреза: по профилям 5 и 6 через зоны потенциальных газонасыщенных объектов (рис. 4) [Соколов и др., 2023]. Под зоной прогнозируемых газовых залежей проявляется вертикальная зона миграции флюидов по разломной зоне, доходящей до глубины 8 км. К горизонту газогидратов выходит неглубокий разлом с глубины около 4 км.

В Чукотском море построены три петрофических разреза по профилям 7–7', 8–8' и 9–9' через потенциально газонасыщенные объекты [Bogoyavlensky et al., 2018; Богоявленский и Кишанков, 2020]. На всех участках прогнозируемых газовых залежей выделены каналы миграции из глубоких горизонтов земной коры. Глубинный генезис газа подтвержден наличием гомологов метана [Богоявленский и Кишанков, 2020].

На профиле 7–7' (рис. 1, рис. 5*а*) к прогнозируемым участкам выходит разломная зона с глубины более 20 км и вертикальный канал с 10 км. Здесь наблюдается переслаивание пород с различными магнитными свойствами с глубиной – чередование слабомагнитных линз со слоями типа флюидоупоров – внутри разломной зоны, что может быть признаком наличия хороших коллекторских свойств у коренных пород.

В северной части площади сейсмических работ на профиле 8–8' (рис. 1, рис. 5*б*) к потенциальным участкам газовых залежей выходит субвертикальный канал с глубины около 10 км, а в южной части выделена мощная разломная зона, поднимающаяся из мантии через всю земную кору с выходом в породы ВЧР. Флюидонасыщенные слои выделяются в земной коре на глубинах около 5 км и 15 км.

В северной части площади сейсмических работ на профиле 9–9' (рис. 1, рис. 5*в*) к прогнозируемым участкам газовых залежей выходит субвертикальный геотермальный канал с глубины около 10–15 км.

На разрезах 8–8' и 9–9' в Чукотском море выявлена большая мощность осадочного чехла, возможно, с хорошими коллекторскими свойствами.

В Чукотском море анализ петрофизических разрезов позволяет прогнозировать проявление и миграцию термогенных газов в породы ВЧР через разломные зоны с глубины 10–20 км.

По магнитным аномалиям и аномалиям поля силы тяжести проведены исследования условий влияния глубинного флюидодинамического фактора в газонасыщенных областях и зонах скоплений газогидратов в Баренцевом, Карском, Восточно-Сибирском, Чукотском морях и море Лаптевых. Это позволило получить представление о модели глубинного строения земной коры в областях с высоким уровнем газонасыщенности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение данных спутникового мониторинга толщины льда шельфовых морей СЛО с петрофизическими разрезами земной коры показало, что литосфера в зонах ускоренного таяния льда имеет специфическое строение, допускающее миграцию глубинных флюидов к поверхности морского дна.

Проведено исследование строения литосферы Арктического шельфа на основе петрофизических разрезов, построенных по аномалиям МПЗ и аномалиям силы тяжести. Анализ данных дистанционного зондирования ледовых условий и визуализация траекторий флюидопотоков и термоактивных разломов на магнитных и плотностных разрезах позволяет выявлять и прогнозировать районы крупных талых ареалов и полыней. Исследование эндогенного флюидодинамического влияния на ледовый режим СМТК позволит оптимизировать выбор наиболее безопасных транспортно-логистических трасс бесперебойного круглогодичного судоходства.

В результате комплексной интерпретации аномалий магнитного поля Земли и аномалий силы тяжести впервые исследована специфика строе-

ния литосферы Арктических морей с доказанной активной эмиссией газа и в районах с повышенной газонасыщенностью. Визуализирована специфика строения литосферы в районах зафиксированных и потенциальных полей газовых залежей и выделений метана в Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Обозначены пути подтока газовых флюидов и оценены глубины миграции термогенных газов в породы ВЧР через разломные зоны.

Анализ петрофизических разрезов районов повышенной газонасыщенности позволил оценить глубины выходящих по разломам флюидных потоков в области проявлений газовых факелов и мега-факелов. Исследования на участках акваторий, где по данным геохимических исследований подтверждены выходы метана, показали, что наиболее значительную роль играют субвертикальные термофлюидные потоки в зонах нарушений глубинного заложения.

Результаты исследований, проведенных для морей Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского показали, что на некоторых участках СМТК могут возникать проблемы навигационной безопасности. Горизонты газогидратов, поля метановых сипов и фонтанов создают факторы повышенного риска, осложняющие мореплавание, эксплуатацию морских нефтегазовых месторождений и транспортировку углеводородного сырья.

На петрофизических разрезах Чукотского моря выявлена большая мощность осадочного чехла, предположительно с хорошими коллекторскими свойствами. К прогнозируемым участкам газонасыщенных объектов [Bogoyavlensky et al., 2018; Богоявленский и Кишанков, 2020] выходит разломная зона с глубины более 20 км и вертикальный канал с 10 км. Выявленная картина переслаивания с глубиной пород с различными магнитными свойствами – слабомагнитных линз с перекрывающими слоями типа флюидоупоров – внутри разломной зоны может свидетельствовать о том, что коренные породы выделенных участков потенциально обладают коллекторскими свойствами.

Полученные результаты исследований арктического шельфа России впервые позволили оценить специфику литосферы районов с высоким уровнем газонасыщенности в виде газовых сипов, фонтанов, факелов и мега-факелов и сделать прогноз появления рисков для судоходства в Баренцевом море, море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях.

На основе двумерного площадного анализа магнитных свойств пород на глубине около 20 км приведена оценка распределения возможных ареалов природных явлений эндогенного характера. В результате исследования выделены наиболее вероятные зоны возникновения опасных природных явлений на акватории СМП.

Исследование локализации зон эндогенного влияния флюидодинамического фактора в областях с высоким уровнем газонасыщенности акватории Арктического шельфа имеет научное, практическое и прикладное значение для уточнения долгосрочных ледовых прогнозов и уменьшения навигационных рисков эндогенного характера. Изучение специфики строения земной коры Арктического шельфа позволяет прогнозировать участки наиболее вероятного возникновения взрывоопасных зон и имеет важное значение для выбора траекторий мореплавания по транспортно-логистической системе СМТК.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 16.5. “Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Атлас ледяных образований // Под общей редакцией В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.

– *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.* Анализ состояния, перспектив и проблем освоения ресурсов углеводородов и угля в Арктике в связи с экономическими, геополитическими и технологическими реалиями // Научные Труды ВЭО России. Т. 228. С. 154–180. 2021. https://doi.org/10.38197/2072-2060-2021-228-2-154-180

– *Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кишанков А.В., Казанин Г.А.* Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. Т. 11. № 2. С. 178–194. 2021a. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-178-194

– *Богоявленский В.И., Кишанков А.В.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях мирового океана: Чукотское море (Россия и США) // Арктика: экология и экономика. № 2 (38). С. 45–58. 2020. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-45-58

– *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. и др.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Восточно-Сибирское море // Арктика: экология и экономика. Т. 12. № 2. С. 158–171. 2022. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-158-171

– *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г.* Распространение субаквальной мерзлоты в море Лаптевых по данным сейсморазведки методом преломлен-

ных волн // Арктика: экология и экономика. Т. 13. № 4. С. 501–515. 2023. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-501-515

– *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. № 4. С. 30–43. 2015.

– *Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А.* Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Вып. 674. С. 207–212. 2020.

– *Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 / Труды XV Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". СПб. С. 288–291. 2020.

– *Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. Т. 9. № 2. С. 88– 106. 2016.

– *Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитревский Н.Н. и др.* О процессах газовыделения и деградации подводных Многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. Т. 55. № 2. С. 312–320. 2015.

– *Матвеева Т.В., Семёнова А.А., Щур Н.А. и др.* Перспективы газогидратоносности Чукотского моря // Записки Горного института. Т. 226. С. 387–396. 2017. https://doi.org/10.25515/PMI.2017.4.387

– *Павленкова Н.И.* Природа региональных сейсмических границ в земной коре и верхней мантии // Материалы XIX Международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". Москва–Борок. Т. 1. С. 250–253. 2018.

– *Петрова А.А., Латышева О.В.* Воздействие флюидодинамического фактора на формирование и изменения ледяного покрова в Северном Ледовитом океане // Вест. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. № 3 (59). С. 53–66. 2023. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-53-66

– *Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. Вып. 41. № 1. С. 37–53. 2019. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53

– *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Глубинное строение Арктики и Антарктики по магнитным аномалиям компонент и аномалиям силы тяжести // Космич. исслед. Т. 60. № 4. С. 331–347. 2022a. https://doi.org/10.31857/S0023420622030086

– *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Природные явления эндогенного происхождения в Арктическом бассейне // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. Вып. 48. № 4. С. 37–53. 2020. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-49-63

– *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Роль глубинных факторов в разрушении ледового покрова на трассах Северного Морского пути / Материалы VII Всероссийской научной конференции "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды", Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского. С. 118–122. 2022.

– *Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А. и др.* Выявление флюидоподводящих каналов в Арктических морях по аномалиям магнитного и гравитационного полей / Материалы Всероссийской конференции "Глобальные проблемы Арктики и Антарктики". ФИЦКИА РАН. Архангельск. С. 810–815. 2020a.

– *Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина "метановой катастрофы": некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. АН. Т. 446. № 3. С. 330–335. 2012.

– *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. и др.* Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС "Академик Николай Страхов" // Арктика: экология и экономика. Т. 13. № 2. С. 164–179. 2023. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-164-179

– *Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкеров С.А.* Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 81–87.

– *Харитонов А.Л.* Геоэкологические аспекты корреляции кольцевых структур, региональных аномалий геофизических полей и месторождений полезных ископаемых // Вестн. МГПУ. Сер.: Естественные науки. № 1(45). С. 27–44. 2022. https://doi.org/10.25688/2076-9091.2022.45.1.3

– *Шипилов Э.В.* Базальтоидный магматизм и сдвиговая тектоника арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Амеразийского бассейна // Геология и геофизика. № 12. С. 2115–2142. 2016. https://doi.org/10.15372/GiG20161202

– *Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А. и др.* Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических морей в современном климатическом периоде // Труды ГОИН. № 220. С 44–60. 2019.

– *Andreassen K., Waage M., Serov P. et al.* Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor // Scientific reports. V. 10. № 1. 8450. 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9

– *Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al.* Flint Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna // Geo-Marin letters. V. 40. P. 541–557. 2020. https://doi.org/10.1007/s00367-020-00655-7

– *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al.* Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. V. 8(12). Article number 453. 2018. https://doi.org/10.3390/geosciences8120453

– *Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al.* World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris, 2012.

– *Petrova A.A., Kopytenko Y.A., Petrishchev M.S.* Deep fluid systems of Fennoscandia greenstone belts // Practical and Teoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. P. 239–247. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28

– *Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I.* Deep Factors of Ice Destruction of the Arctic Ocean / Problems of Geocosmos–2020: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. P. 41–52. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_4

– *Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I.* Specifics of the Earth's Crust Structure in the Potential Gas Hydrate Accumulation Zones of the Arctic Basin / Problems of Geocosmos–2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham. P. 25–39. 2022a. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_3

– *Serov P., Mattingsdal R., Winsborrow M. et al.* Widespread natural methane and oil leakage from sub-marine Arctic reservoirs // Nat Commun. V. 14. 1782. 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37514-9

– *Shakhova N., Semiletov I. and Chuvilin E.* Geosciences Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // Geosciences. V. 9. № 6. P. 1–23. 2019. https://doi.org/10.3390/geosciences9060251

– *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf // J. of Geophysical Research. V. 115. C08007. 2010.

– *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Phil.Trans. R. Soc. A 373:20140451. 2015.

– *Thebault E., Vigneron P., Langlais B. et al.* Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // Earth, Planets and Space. V. 68. Article number 126. 2016. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5

– *Wallmann K., Riedel M. et al.* Gas hydrate dissociation off Svalbard induced byisostatic rebound rather than global warming // Nature Communications., 9:83. 2018. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02550-9

Localization of Endogenous Influence Zones In Areas With a High Level of Gas Saturation by Magnetic Field Anomalies

A. Petrova[1, *], O. V. Latysheva[1, **]

[1]*St. Petersburg Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*

**e-mail: aa_petrova@inbox.ru*

***e-mail: l-olli@yandex.ru*

Based on the interpretation of the Earth's magnetic field anomalies and gravity anomalies, the structure of the Arctic lithosphere in areas of increased gas saturation of bottom sediments has been studied. The analysis of density and magnetic sections has shown that the lithosphere in the zones of methane fluxes and gas hydrates is characterized by the presence of thermo-fault that remove fluid flows from the Earth crust and mantle. In areas of aquatories where, according to geochemical studies, methane outputs of deep genesis have been confirmed for the first time, the trajectories of fluid flows coming from a depth of the Earth crust and mantle have been traced on petrophysical sections. The study of the influence of the endogenous fluid-dynamic factor make it possible to optimize the choice of safe shipping routes along the Northern Sea Route in the fields of methane emissions.

Keywords: Arctic, magnetic anomalies, endogenous factors, gas seeps