



УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОИ ДВО РАН

Д.В. Макаров

» декабря 2025 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного
отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)

на диссертационную работу

Смирнова Юрия Юрьевича

на тему

**«Временная динамика зон стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе
российских морей»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по
специальности 1.6.17 – Океанология (географические науки)

Актуальность. Диссертационное исследование Ю.Ю. Смирнова посвящено решению одной из наиболее комплексных и актуальных проблем современной геокриологии, морской геологии и физической океанологии – воссозданию эволюционной картины формирования и деградации криогенных (связанных с мерзлотными процессами) газогидратных систем на обширном и стратегически важном шельфе российской Арктики.

Газовые гидраты, особенно ассоциированные с криолитозоной, представляют собой уникальный природный архиватор информации, фиксируя изменения термобарических условий, являясь чувствительным индикатором динамической системы «литосфера-гидросфера-криосфера-атмосфера» в геологическом времени. Изучение временной динамики газогидратов – это, по сути, изучение инерционности и отклика геологической среды на глобальные климатические вызовы: оледенения, колебания уровня Мирового океана, изменения теплового потока и газовой миграции. Работа вносит весомый вклад в понимание этих долгопериодных процессов и их взаимосвязей. В условиях наблюдаемого и прогнозируемого потепления в Арктике, проблема стабильности природных резервуаров метана, в том числе в форме гидратов, приобрела глобальный контекст. Потенциальная дестабилизация гидратов и сопутствующая эмиссия метана рассматриваются как один из

возможных сценариев усиления парникового эффекта, и, как следствие, один из триггеров масштабных изменений параметров окружающей среды. Исследование, позволяющее количественно оценить историческую изменчивость зон стабильности и выделить наиболее уязвимые участки, является критически важным для построения достоверных климатических моделей и оценки экологических рисков.

Арктический шельф России – потенциальная крупнейшая ресурсная база углеводородов XXI века. Газогидраты, долгое время считавшиеся лишь научным курьезом, сегодня рассматриваются как реальный, хотя и нетрадиционный, источник энергии. Работа Ю.Ю. Смирнова предоставляет научно обоснованный инструментарий для прогнозного картирования зон возможной гидратоносности, что является первым и необходимым этапом для оценки ресурсного потенциала и планирования будущих геологоразведочных работ, особенно в свете задач освоения Северного морского пути.

Наличие субаквальной мерзлоты и гидратов напрямую определяют геотехнические условия на шельфе. Они влияют на устойчивость донных оснований, безопасность бурения скважин, прокладки трубопроводов и установки платформ. Ошибки в оценке этих факторов могут привести к катастрофическим последствиям и огромным экономическим потерям. Созданные в диссертации детальные прогнозные модели и карты представляют собой ценный практический продукт для инженерно-геологического обеспечения хозяйственной деятельности в Арктике.

Автор убедительно показывает, что, несмотря на возрастающий интерес, пространственно-временная картина распространения субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) и зон стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) на Евразийском шельфе остается фрагментарной и в значительной степени умозрительной. Особенно малоизученным является влияние последнего покровного оледенения. Таким образом, диссертация направлена на заполнение конкретного и значимого пробела в знаниях.

Актуальность работы носит многоплановый характер, выходящий за рамки узкоспециальных интересов, и глубоко обоснована автором.

Цель работы: анализ временной динамики СММП и ЗСГГ на основе численного моделирования с учетом палеоклиматических и гляциологических факторов. Цель полностью соответствует актуальным вызовам и обладает высокой научной емкостью.

Для ее достижения поставлен логически выстроенный комплекс задач, охватывающий все этапы исследования:

1. Создать математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности, а также динамики ледниковых покровов.

2. Разработать программное обеспечение для реализации моделей на языке «С» (Си), на основе открытых данных и литературных источников сформировать массивы данных для краевых условий.

3. Выполнить прогноз по моделям, валидацию моделирования на основе данных полевых исследований и сравнении с результатами аналогичных работ для оценки качества прогноза.

4. Провести анализ пространственно-временной изменчивости субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности газовых гидратов на арктическом шельфе по результатам моделирования.

5. Провести анализ возможности формирования и сохранения зон стабильности газовых гидратов различного генетического типа.

Методологическая основа работы является современной и адекватной поставленным задачам. В качестве базовой физической модели выбран классический, но не теряющий актуальности, подход на основе решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности с фазовым переходом (задача Стефана). Автор использовал алгоритм синтеза температуры на поверхности дна, который автоматически переключается между субаквальным режимом (температура придонной воды) и субэральным (температура воздуха) в зависимости от реконструированного палеоуровня моря (RSL). В усложненной модели PEGAS+Peltier в верхнее граничное условие включен учет давления и температуры у основания ледника, а также изостатических движений земной коры. Это новаторский для российских исследований шаг, позволяющий впервые качественно оценить роль Евразийского ледника. Использование модели эффективной теплопроводности для многокомпонентной среды и зависимость теплоемкости от фазового состава поровой воды повышают физическую достоверность расчетов. Модель использует данные из авторитетных глобальных и региональных источников: реанализ ERA5 (температура атмосферы), GLORYS12V1 (температура и соленость придонной воды), GEBCO (batimетрия), современные модели теплового потока и палеореконструкции (de Boer et al., ICE-7G_NA), что обеспечивает высокое качество входной информации.

Таким образом, методология работы представляет собой удачный синтез проверенных физических принципов и современных вычислительных и информационных технологий.

Научная новизна, сформулированную в пяти пунктах, заключается в следующем.

Впервые для российского арктического сектора создан комплекс взаимосвязанных математических моделей (PEGAS, PEGAS+Peltier) и зарегистрированных программных комплексов, позволяющих проводить высокоразрешающие расчеты эволюции СММП и

ЗСГГ с учетом как современной климатической зональности, так и палеогляциологических сценариев. Самостоятельная разработка ПО на языках С и Python свидетельствует о высоком уровне квалификации автора как исследователя-расчетчика. Фактическая и содержательная новизна: получены первые детализированные ($0.08^\circ \times 0.08^\circ$) цифровые карты глубины залегания кровли и мощности реликтовых СММП и ЗСГГ для всего Евразийского арктического шельфа. Впервые количественно оценено и смоделировано влияние Евразийского покровного оледенения (сартанского) на криолитозону шельфа. Получен важнейший вывод о том, что ледник в «теплом» режиме не столько формировал новую мерзлоту, сколько создавал мощные субгляциальные зоны стабильности гидратов за счет комбинации низких температур у ложа и колоссального давления.

Впервые выделены и локализованы специфические генетические типы ЗСГГ:

- «Постмерзлотные» ЗСГГ: сохраняющиеся в немерзлых, но охлажденных отложениях после деградации СММП, благодаря тепловой инерции системы (Чукотское, Печорское моря).
- «Постледниковые» ЗСГГ: реликты мощных субгляциальных гидратных образований, деградирующие «сверху» и сохранившиеся до наших дней в виде островков в центральной части Баренцева моря.

Установлены ключевые закономерности временной динамики: выявлен временной лаг (~5 тыс. лет) в реакции ЗСГГ на климатические изменения по сравнению с СММП, что подтверждает их роль как инерционного элемента системы; установлена связь максимального сокращения площадей СММП и ЗСГГ с эпохами морских регрессий, когда в результате длительного и плавного понижения уровня, существенные площади затапливаемы террас оставались под водой и испытывали длительное растепление; показана возможность потери и последующего восстановления до 50% площади этих зон в течение одного ледниково-межледникового цикла.

Таким образом научная новизна работы и ее результатов не вызывают сомнений.

Практическая значимость заключается в том, что автором был разработан и внедрен в производственный процесс ФГБУ «ВНИИОкеангеология» технологический цикл оценки газогидратоносности, основанный на авторских моделях, что подтверждается свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ (автор – Смирнов Ю.Ю. и др., правообладатель – ФГБУ «ВНИИОкеангеология»).

Степень обоснованности и достоверности результатов обеспечивается комплексом мер, предпринятых автором:

- Модельные расчеты для Печорского и Карского морей сопоставлялись с реальными данными бурения, вскрывшего мерзлоту, и результатами сейсмоакустического

профилирования. Отмечаемая корреляция, несмотря на «большую неопределенность» самих натурных данных, является важным аргументом в пользу адекватности модели PEGAS.

- Автор проводит сравнение своих карт распространения СММП с результатами зарубежных коллег (Overduin et al., 2019), что показывает согласованность в основных чертах.

- Проведен анализ влияния шага по времени, точности интерполяции данных. Критически важным является вывод о том, что основным источником неопределенности является не детализация климатических полей, а точность задания теплового потока. Это честная и профессиональная оценка ограничений модели.

- Автор открыто говорит о принятых допущениях: горизонтальная однородность теплофизических свойств на крупном масштабе, оценка незначимости солевой диффузии для данного масштаба моделирования. Понимание границ применимости своей модели – признак зрелости исследователя.

Единственным относительно слабым местом в цепи доказательств является валидация наиболее новаторской части – прогноза «последних» ЗСГГ в Баренцевом море. Прямых данных для их подтверждения пока нет, что и отмечает автор. Однако теоретическая обоснованность этого вывода (через корректный учет ледниковых условий) высока, и он формулируется именно как прогноз, требующий дальнейшей проверки.

Апробация работы. Широкая апробация на 11 крупных конференциях и публикация основных результатов в ведущих рецензируемых журналах («Георесурсы», «Криосфера Земли», «Geotectonics») прошли внешнюю оценку научного сообщества и подтверждают качество работы. В большинстве публикаций и практически во всех докладах на конференциях соискатель является первым автором или докладчиком, что подтверждает его личный вклад.

Структура, содержание и оформление работы. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список использованной литературы из 210 ссылок и два приложения. Работа изложена на 124 страницах, включает 50 рисунков и три таблицы.

Введение обосновывает высокую актуальность изучения криогенных газогидратов в условиях климатических изменений и недостаточной изученности влияния плейстоценовых оледенений, четко формулируя цель, задачи и научные положения, подлежащие защите.

Первая глава выполняет роль критического аналитического обзора, систематизируя существующие подходы к моделированию субаквальной мерзлоты и обнажая ключевой

пробел в исследованиях — отсутствие учета воздействия покровного оледенения и локальных колебаний уровня на эволюцию гидратных систем.

Вторая глава представляет собой детальное описание разработки оригинальной высокоразрешающей математической модели PEGAS, основанной на решении уравнения теплопроводности с фазовым переходом и динамическим граничным условием, синхронизированным с палеоуровнем моря.

Третья глава содержит результаты прогнозного моделирования по базовому сценарию (PEGAS), их валидацию с натурными данными и выявление первых закономерностей пространственно-временной динамики СММП и ЗСГГ, включая выделение «постмерзлотных» зон, а также задержку между деградацией СММП и ЗСГГ.

Четвертая глава посвящена созданию и обоснованию усложненной модели PEGAS+Peltier, в которую интегрированы механизмы влияния ледниковой нагрузки, изостатических движений и температурного режима у подошвы ледника на основе ледниковой модели ICE-7G_NA.

Пятая глава представляет синтез результатов моделирования с учетом покровного оледенения сартанского времени, приводя к ключевому выводу о формировании, эволюции и современной локализации специфических «постледниковых» зон стабильности газовых гидратов в Баренцевом море.

Диссертация имеет традиционную и логичную структуру: введение, пять глав, заключение, библиография, приложения, что соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011. Содержание глав последовательно раскрывает путь от постановки проблемы к получению результатов. Широкая библиография, включающая как классические, так и самые современные источники, свидетельствует о глубине проработки темы. Работа имеет внутреннее единство и завершенность.

Замечания. Несмотря на высокий уровень работы, некоторые аспекты могли бы быть развиты или более явно отражены в диссертации:

1. В работе содержится приличное количество опечаток, самые грубые из них — перепутанные районы Карского моря в Главе 3 («северо-восточная» и «северо-западная» части Карского моря). Так, на стр. 70 упоминаются «мощные» СММП северо-западной части Карского моря «близ о. Северная Земля», на стр. 72 речь уже идет о «меньших в реальности масштабах распространения» СММП в северо-западной части Карского моря. По всей видимости, в данных предложениях речь идет о «северо-восточной» части Карского моря, что подтверждается представленным здесь же, в Главе 3, картами СММП.

2. Для усиления доказательной базы было бы крайне полезно, если бы автор попытался найти косвенные геофизические индикаторы (например, аномалии в данных

сейсмического профилирования – «bottom simulating reflectors, BSR») в районах, прогнозируемых «последниковых» ЗСГГ в Баренцевом море. Даже отрицательный результат такого поиска с обсуждением причин (малая мощность, отсутствие свободного газа) был бы ценен.

3. Обсуждение горизонтальных потоков. Одномерная постановка, безусловно, оправдана для первого приближения и региональных оценок. Однако в заключении или перспективах следовало бы четче обозначить, что следующей ступенью развития модели должен стать учет 2D/3D эффектов: горизонтальный теплоперенос, влияние криопэгов и соляных диапиров, флюидодинамики.

4. Анализ чувствительности к тепловому потоку – сильная сторона работы. Было бы еще более убедительно представить эту неопределенность в виде картографического продукта – например, карты возможного диапазона мощности СММП/ЗСГГ при вариациях HF в пределах ошибки модели.

5. Работа сосредоточена на палеодинамике. Краткий, но содержательный раздел или параграф, посвященный сценариям эволюции выявленных ЗСГГ в XXI-XXII веках в условиях антропогенного потепления (например, по моделям CMIP6), значительно усилил бы прикладное и экологическое звучание выводов. С какими временными лагами можно ожидать их дестабилизацию? Будет ли деградация мерзлоты и ЗСГГ развиваться по сценарию, близкому к представленному на Рис. А.3. в приложении А в условиях меняющегося климата?

Эти замечания не умаляют ценности проведенного исследования, а, скорее, намечают пути для его дальнейшего развития и углубления.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат написан грамотно, логично, его содержание полностью соответствует диссертационной работе автора. Иллюстративный материал автореферата имеет высокое качество.

Заключительная часть.

Диссертация Смирнова Юрия Юрьевича «Временная динамика зон стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе российских морей» представляет собой законченное, самостоятельное и высококачественное научное исследование, выполненное на стыке океанологии, геокриологии, морской геологии и информационных технологий.

Автор продемонстрировал глубокое знание предметной области и современной научной литературы, высокую квалификацию в области математического моделирования геокриологических процессов в океане и программирования, умение ставить комплексные задачи и последовательно их решать, навыки критического анализа результатов и оценки

их достоверности, способность получать научные результаты, имеющие не только теоретическую, но и прямую практическую ценность, подтвержденную фактом внедрения.

Научные положения, выносимые на защиту, сформулированы четко, новы и убедительно обоснованы материалами диссертации. Работа соответствует паспорту специальности ВАК 1.6.17 – Океанология по пунктам 2, 7, 9, 10 и 15.

Работа в достаточной степени апробирована и вносит существенный вклад в развитие полярной океанологии, изучение арктической подводной криолитозоны и газогидратных систем, открывая новые направления для исследований и предоставляя надежный инструментарий для решения прикладных задач, связанных с прогнозом опасных геологических процессов и явлений на море, а также обоснования минерально-сырьевой базы Российской Федерации.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, СМIRНОВ ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ, заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Диссертация обсуждалась на заседании Океанологического семинара ТОИ ДВО РАН 10 декабря 2025 г. (протокол № 11), отзыв утвержден на заседании Океанологического семинара 10 декабря 2025 г. (протокол № 11).

Отзыв составил: доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Шакиров Ренат Белалович.

08.12.2025 г.

подпись

Я, Шакиров Ренат Белалович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

08.12.2025 г.

подпись

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Фактический адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

Тел.: +7 (423) 231-1400. Сайт www.poi.dvo.ru.