

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Ю.Ю. Смирнова «Временная динамика зоны стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе российских морей», представленной на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17. - океанология.

Диссертация Ю.Ю. Смирнова посвящена исследованию одного из самых мало изученных природных феноменов в Арктике – динамике зоны стабильности газовых гидратов на шельфе арктических морей. В названии диссертации присутствует формулировка «...российских морей», но, очевидно, что это просто описка автора, в диссертации речь идет именно об арктических морях. **Актуальность** темы диссертации обусловлена в первую очередь недостаточной изученностью процессов формирования, динамики и деградации криогенных газовых гидратов в географическом и океанологическом смысле. По большей части имеющиеся публикации посвящены физико-химическим аспектам образования и стабильности газовых гидратов, работ, посвященных их потенциальному распространению и стабильности в условиях меняющегося климата и гидрологии морей в Арктике, практически нет. В этом смысле исследование Ю.Ю. Смирнова можно считать пионерным. Актуальность темы диссертации не ограничивается только малой изученностью, еще большее значение имеет роль криогенных газовых гидратов метана в глобальном цикле углерода и климатических изменений. Обоснованно считается, что разложение газовых гидратов на шельфе арктических морей является причиной постоянной эмиссии метана на арктическом шельфе и образования метановых сипов и газовых воронок, которые по свидетельству И.П. Семилетова в Карском море могут достигать первых сотен метров – т.н. мегасипы. Наличие криогенных газовых гидратов на шельфе представляет собой важнейший фактор природной среды, определяющий условия природопользования при разработке месторождений углеводородов (Харасовейское, Крузенштерновское и другие перспективные месторождения), развитии Северного морского пути, строительства и эксплуатации портовых сооружений и судовых подходов к причальным сооружениям. Наконец, определение распространения и условий стабильности газовых гидратов метана позволяет выполнить ресурсные оценки и рассматривать газовые гидраты в Арктике в качестве потенциального нетрадиционного энергетического ресурса.

В структурном отношении диссертация содержит Введение, пять глав, Заключение, Список использованной литературы и Приложения.

Соискатель справедливо отмечает, что в силу специфики природных условий на шельфе арктических морей криогенные газовые гидраты должны рассматриваться совместно с субаквальными многолетнемерзлыми породами (СММП), поэтому **цель исследования** формулируется как анализ временной динамики субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности

криогенных газовых гидратов российского шельфа Арктики на основе численного моделирования с учетом изменения термобарических и связанных с ними климатических и ледниковых палеоусловий. Здесь допущена небольшая неточность – в действительности климат определяет термобарические условия, но не наоборот.

Из формулировки целей вытекают научные задачи, сформулированные автором, решение которых позволяет достичь поставленной цели. С задачами работы можно согласиться.

В основу методологии исследования Ю.Ю. Смирнова положено математическое моделирование процессов формирования и устойчивости газовых гидратов и СММП в их парагенетической связи и с учетом палеогеографических условий их формирования и последующей эволюции. В условиях крайне ограниченной фактической информации о СММП и, тем более, газовых гидратов на шельфе арктических морей с выбранной методологией исследования также можно согласиться и считать ее эффективной для решения поставленных задач.

В первом разделе диссертации рассмотрено состояние исследований криолитозоны российской Арктики, кратко приведены данные о климатической истории Земли, развитии ледников в контексте возможного формирования ЗСГГ, методические подходы к моделированию СММП и ЗСГГ. Автор не только анализирует имеющиеся публикации, но и научно-технические отчеты, в которых зачастую содержится более подробная информация по изучаемой проблематике. Здесь необходимо отметить несколько обстоятельств, которые в дальнейшем несколько повлияли на итоговые результаты: 1) выделение в криолитозоне мерзлых и морозных пород не вполне корректно в контексте задач исследования по моделированию промерзания-протаивания седиментационно засоленных несвязных четвертичных пород морского генезиса, для которых критичной температурой является не нулевая температура, но температура фазовых переходов, зависящая от степени засоленности. Для оценки условий формирования СММП и ЗСГГ более целесообразно было бы выделять собственно мерзлые (содержащие лёд) и отрицательно температурные не мерзлые породы (с отрицательной температурой, но не содержащие льда). К морозным обычно относят скальные породы с отрицательной температурой, но не содержащие льда в силу исключительно низкой пористости. 2) соискатель представил модель последнего оледенения, в соответствии с которой рассматривается существование двух крупных ледниковых покровов большой мощности – Скандинавского и Баренцево-Карского. Однако, существование сплошного мощного Баренцево-Карского ледяного щита подвергалось сомнению и ранее (Гусев, 2013; Polak et al., 2009), а сейчас появляется все больше свидетельств о том, что оледенение характеризовалось скорее группой разрозненных ледяных щитов сравнительно невысокой мощности (не километры). Из этого следует, что и

прогибание земной коры и последующее эвстатическое поднятие было не столь значительным.

При математическом моделировании с использованием уравнений теплопроводности с фазовыми переходами важную роль играет обоснование и выбор модели, свойств промерзающих-протаивающих пород и граничных условий. В диссертации этому посвящен отдельный раздел. Соискателем приняты значения коэффициента теплопроводности двухкомпонентной среды и использована величина эффективной теплопроводности. За начало фазовых переходов принята температура замерзания морской воды. Я считаю, что такой подход переусложняет модель, а выбор температуры фазовых переходов как температуры замерзания морской воды является излишне консервативным и приводит к значительным искажениям в оценках мощности и положения кровли СММП и ЗСГГ. Мне кажется, что использование прямых значений температуры фазовых переходов в зависимости от генезиса (морские или континентальные) и степени засоленности промерзающих пород были бы более простыми и эффективными, и в большей мере связанными с геологическим строением шельфа арктических морей. Тоже относится и к выбору верхнего граничного условия. Почти повсеместно используемый при моделировании переход от общеглобальных климатических моделей к конкретным значениям температуры воздуха в конкретном регионе (акватории) представляется слишком смелым. Тем более, почти никогда не приводятся сравнения расчетных значений температуры и установленных по палеогеографическим реконструкциям (см. работы Ю. Васильчука, Г. Облогова, В. Ивановой, Н. Мауер и др.). Другим принципиальным недостатком модели считаю отождествление температуры воздуха и осушенной поверхности шельфа. Это также присуще всем известным математическим моделям (Malakhova et al., 2020, Gavrilov et al., 2020). В тоже время многочисленные данные мониторинга мерзлоты и сравнения температуры воздуха и температуры поверхности показывают, что отношение среднегодовой температуры поверхности к температуре воздуха изменяется от 0,4 до 1,05 в зависимости от биоклиматической зоны и типов доминантных ландшафтов, в среднем 0,7. Таким образом, при математическом моделировании неучет принадлежности осушенных участков шельфа к той или иной биоклиматической зоне приводит обычно к завышению мощности промерзшей толщи, а в нашем случае и мощности ЗСГГ. Однако, развитие автором предложенного подхода с использованием реанализа позволило разработать зонирование акваторий Российской Арктики, которое представляет собой серьезный вклад соискателя в исследование СММП и ЗСГГ.

Результаты моделирования приведены в заделе 3. Основным достижением соискателя считаю построение мелкомасштабных карт (рис. 23 и 28-30) распространения, глубины залегания кровли и мощности СММП для всех морей Российской Арктики. Это наиболее **значимый научный результат**, который имеет большой потенциал и для дальнейшего развития

исследований в этом направлении, и для возможного прогнозирования деградации СММП при современных изменениях климата и придонной температуры. Автор показал работоспособность развиваемого им подхода, выполнил сравнение модельных и фактических данных на примере двух участков акватории Арктики, разъяснил природу наблюдаемых расхождений. Построенные карты имеют хороший потенциал и для **практического применения**, поскольку позволяют предварительно оценить ожидаемые инженерно-геокриологические условия участков акватории арктических морей при предполагаемом освоении.

На основании моделирования выявлены границы распространения и мощности ЗСГГ криогенного типа для трех временных срезов – 72, 20 и 1 т.л.н. и для современности. Также как и для СММП, карты построены для всех морей Российской Арктики. Выявлен эффект задержки в скорости деградации СММП и ЗСГГ, вызванной запаздыванием в изменении теплового поля с глубиной: СММП сокращается раньше, чем ЗСГГ, опережая зону стабильности приблизительно на 5 тыс. лет. На основе сопоставления геологического строения шельфа и расчетных термобарических условий построена карта потенциально газогидратоносных провинций в арктических морях. Впервые на шельфе Баренцева моря локализовано распространение зон стабильности криогенных газовых гидратов криогенного типа.

Таким образом, полученные Ю.Ю. Смирновым научные результаты являются **новыми и оригинальными**, имеют высокий потенциал дальнейшего развития и практического применения.

Отдельный раздел диссертации посвящен совершенствованию исходной авторской модели PEGAS за счет учета влияния ледниковых покровов, незамерзшей воды и диффузии солей при продвижении фазовой границы. В модельных расчетах учтено влияние гляциоизостазии сартанского времени на временную динамику СММП и ЗСГГ, что позволило оценить вклад ледниковой динамики в неоднородность колебаний уровня на шельфе, а также вклад ледника в формирование подледниковой ЗСГГ и дальнейшую эволюцию этой ЗСГГ. Показано, что вклад диффузии солей в процессы промерзания-протаивания отложений на шельфе пренебрежимо мал. На взгляд рецензента, в данном случае соискатель усовершенствовал модель, но получил интуитивно понятные результаты об их сравнительно низком влиянии.

Последний раздел посвящен анализу пространственно-временной динамики СММП и ЗСГГ, приведены соответствующие схематические карты. Наибольшие мощности СММП и ЗСГГ приурочены к северо-восточной части Карского моря и его притаймырскому шельфу. Показано, что высокая инерционность мерзлых морских отложений как динамической системы приводит к тому, что ЗСГГ криогенного типа может продолжать существовать в районах, СММП.

В Заключении автором в краткой форме освещены основные полученные результаты.

Список литературы включает в себя все основные публикации, относящиеся к тематике диссертации.

Оппонент особо отмечает, что сделанные замечания не умаляют значимость и новизну полученных результатов, не снижают общую высокую оценку диссертации, но направлены на дальнейшее развитие исследований.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию, в нем приведены все необходимые сведения о структуре и содержании диссертационной работы.

Основные научные положения и результаты исследований соискателя представлены в четырех статьях, опубликованных в ведущих научных журналах из списка ВАК, доложены и были поддержаны на крупных научных конференциях. Зарегистрированы два программных комплекса для расчетов параметров зоны стабильности криогенных и субаквальных газовых гидратов.

Таким образом можно констатировать, что соискателем Ю.Ю. Смирновым представлено завершенное научное исследование, выполненное на актуальную научную тему, получены новые оригинальные научные результаты, имеющие высокую научную значимость и перспективы для практического использования.

Диссертационная работа Ю.Ю. Смирнова «Временная динамика зоны стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе российских морей», полностью соответствует требованиям п.9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Соискатель Ю.Ю. Смирнов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата географических наук по научной специальности 1.6.17. – океанология.

Официальный оппонент: доктор геолого-минералогических наук, гл. научн. сотрудник Института криосферы Земли - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, тел +7 9031166624, al.a.vasiliev@gmail.com.

9 декабря 2025 г.

ВЛ

Васильев А.А.

Я, Васильев Александр Алексеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись заверено
Главной специалисткой
Курки М.Ю.

