

ОТЗЫВ
официального оппонента
Рокоса Сергея Игоревича
на тему:

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

представленной на соискание ученой степени кандидата географических наук
(специальность 1.6.17- Океанология)
Смирновым Юрием Юрьевичем

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из Введения, пяти текстовых глав с иллюстрациями, Заключение, Списка использованной литературы и двух приложений.

Во **Введении** представлены обоснование актуальности, сформулированы цель и исследования, перечислены задачи, указаны объект и предмет исследований, научная новизна и сформулированы защищаемые положения. Описан личный вклад автора. Также приведены характеристики исходных данных и оценены достоверность полученных результатов, практическая значимость работы и соответствие паспорту специальности. Приведены данные по апробации работы, перечень публикаций по защищаемой теме и описана структура диссертации и представлены благодарности.

В целом данный раздел написан в традиционном для работ такого рода стиле и содержит все необходимые рубрики (подразделы). По мнению оппонента подраздел *Актуальность* излишне просторен и, при том, достаточно расплывчат, перенасыщен упоминаниями общеизвестных и тривиальных фактов и положений. Следовало бы более кратко, четко и конкретно сформулировать актуальность защищаемой темы с разделением ее на практический и теоретический аспекты.

Также следовало бы указать в одной из рубрик (например, в *Объекте исследований*), что в работе рассматриваются исключительно вопросы, связанные с гидратами метана.

Защищаемые положения достаточно оригинальны и актуальны. Их обоснованность определяется геологическими условиями изучаемой среды и историей геологического развития изучаемого региона, а также проблематикой генезиса и стабильности газогидратов.

Другие ключевые рубрики, касающиеся целей и задач, а также научной новизны и личного вклада автора сформулированы вполне четко и корректно. Уровень апробации и количество публикаций вполне достаточны для соискания звания кандидата географических наук по указанной тематике.

ГЛАВА 1. ПАЛЕОУСЛОВИЯ ЕВРАЗИЙСКОГО ШЕЛЬФА АРКТИКИ

1.1. Криолитозона и реликтовая мерзлота на шельфе

В данном разделе автор приводит компилятивную характеристику шельфовой криолитозоны, в общих чертах рассмотрены вопросы замерзания поровой влаги.

Следует отметить, что автор приводит в определении понятия «многолетнемерзлые породы» в качестве обязательного условия наличие в их составе льда («воды, перешедшей в твердую фазу»). В канонических определениях многолетнемерзлых пород,

представленных, например, в Геологическом Словаре, Горной Энциклопедии и др. авторитетных справочных изданиях, указанное условие не является обязательным. При этом породы с отрицательными температурами, но не содержащие лед, несколько огульно именуются автором «морозными». Возможно, здесь бы следовало более подробно указать причины, по которым в породах с отрицательной температурой может отсутствовать лед и разделить их в зависимости от этих причин (например, как принято в инженерной геологии, на охлажденные и морозные) со ссылками на использованную классификацию. В целом автором здесь все же было выполнено разделение на мерзлые льдистые образования и отложения с отрицательной температурой, не содержащих в своем составе льда, что несомненно свидетельствует о понимании сути термина «многолетнемерзлые породы».

1.2. Зона стабильности криогенных газовых гидратов

В данном разделе автор рассматривает условия стабильности криогенных газогидратов различного типа на шельфе на основе опубликованных материалов. Данный раздел представляет собой обзор публикаций по известным районам развития скоплений газогидратов указанного генезиса. В заключение автор делает совершенно справедливые, но не оригинальные выводы о необходимости комплексного подхода к прогнозу возможного наличия газогидратов.

1.3. Регион исследования

В разделе приводится обзорная характеристика района исследований, основанная на опубликованных данных. Акцентировано рассматриваются отличия природных и геологических условий морей восточного и западного секторов российской Арктики. Справедливо отмечается, что указанные отличия обусловлены различной историей геологического развития данных секторов.

При этом уровень последней позднеплейстоценовой регрессии (-120 м) принимается одинаковым для всех районов арктического шельфа. Учитывая общепринятую точку зрения о глобальном эвстатическом характере данной регрессии, такая позиция может быть отчасти и справедлива. Однако, здесь бы следовало упомянуть о возможных неопределенностях, связанных с дифференциацией амплитуд и направленности неотектонических движений в разных районах российского арктического шельфа. При этом, конечно, возникают серьезные трудности с отсутствием достаточных (тем более обобщенных) данных о неотектонике рассматриваемых областей.

В разделах ниже по тексту и в разд. 1.2 проблема дифференциации уровней последней регрессии в различных районах отмечена. Однако внутренние ссылки в данном тексте на эти разделы отсутствуют, что делает данный раздел не связанным с другими.

1.4. Методические подходы к моделированию СММП и ЗСГГ

Следует сразу отметить, что данный раздел в составе рассматриваемой главы не вполне уместен. Скорее, его следовало бы поместить в Главу 2.

В разделе содержится описание и критический анализ моделей формирования и временной динамики цифровых моделей шельфовых многолетнемерзлых пород и газогидратов, составленных ранее. Описание моделей в целом достаточно полное. Анализ указывает на ограничения и допущения, применяемые в этих моделях, которые делают их не вполне адекватными по отношению к природной картине. Справедливо отмечено, что общим недостатком описанных моделей является недостаточный учет солености и

диффузии водорастворимых солей. Критика указанных моделей также вполне объективна и справедлива.

1.5. Климатическая история Земли

Данный раздел представляет собой, по сути, компилятивный обзор климатических изменений в Арктике, охватывающий время от плейстоцена до голоцена. Представляется, что охват столь широкого временного интервала избыточен. Здесь следовало бы сосредоточиться в основном на палеоклиматической истории позднего плейстоцена и голоцена. С другой стороны, понятно очевидное желание автора представить климатические события позднего кайнозоя в виде единой цепи последовательных событий.

1.6. Покровное оледенение евразийского шельфа

В данном разделе рассмотрены гипотезы развития плейстоценовых оледенений арктического шельфа. В основном рассмотрена история последнего оледенения, что соответствует общей канве диссертационной работы. При этом в отдельных подразделах рассматриваются история оледенения и влияние покровных ледников на формирование криолитозоны и газогидратов. Отмечена обратная пространственная связь между областями развития покровного оледенения и распространения мерзлых льдистых отложений. Отдельно и подробно рассмотрена гипотеза о возможности зоны стабильности газогидратов под подошвой ледников.

1.7. Геотермическая изученность Евразийского шельфа

В целом название раздела не вполне корректное, т.к., по мимо изученности, автор анализирует здесь собственно геотермические условия, а не только изученность.

Представлен обзор геотермических условий района по опубликованным данным. Проведен критический анализ доступных данных и сделан вывод об их недостаточности. Кроме того, автор указывает на то, что, используя открытую базу геотермических данных (Global Heat Flow Database (GHFD)), он подготовил выборку по району исследований. Данная выборка была дополнена данными автора, также полученными из открытых источников.

Автор в основном сосредоточился на оценках глубинного теплового потока. При этом данные о собственно температуре в осадочной толще не приводятся. Отсутствуют оценки температур мерзлых и талых (протаявших) отложений в области позднеплейстоценового промерзания. Также нет достаточно полных оценок температуры поверхности дна. Отчасти эти оценки приводятся в следующих главах в разделах, описывающих верхние граничные условия авторской модели и результаты моделирования. В данном разделе следовало бы привести более подробные данные о температурах по всему интервалу возможного гидратообразования.

Кроме того, в разделе не приведены данные и/или гипотезы о значениях температуры и их градиентах в верхней части разреза в областях, испытавших промерзание и областях, подвергнувшихся оледенениям и/или остававшимся под водным покровом. Базовая и общепризнанная модель Остеркама (Osterkamp) температурного режима шельфовых мерзлых реликтов упомянута лишь вскользь. Поскольку автор напрямую связывает стабильность газогидратов метана криогенного типа с геокриологическими условиями, указанные гипотезы, данные, гипотезы и оценки были бы весьма желательны.

1.8. Геокриологическая изученность Евразийского шельфа

Как и для раздела 1.7. название не вполне корректно, т.к. здесь, в большей степени рассматриваются собственно геокриологические условия. Эти условия характеризуются автором в двух подразделах по фондовым и опубликованным буровым и геофизическим данным. Отмечено, что геокриологическая изученность восточного сектора российского арктического шельфа, по сравнению с его западным сектором, весьма слабая. Также рассмотрены гипотезы происхождения мерзлых образований шельфа, приведены факты обнаружения мерзлых льдистых грунтов в кернах скважин и интерпретации сейсмических данных, показывающие наличие мерзлых отложений.

Из контекста следует, что автор придерживается гипотезы о реликтовом происхождении мерзлых отложений арктического шельфа. Упомянута также и гипотеза Н.А. Шполянской о субаквальном промерзании донных отложений. Однако, авторская точка зрения на эту гипотезу осталась не обозначенной, отмечено лишь, что она не подтверждена фактическим материалом.

В подразделе, описывающем факты обнаружения мерзлых льдистых грунтов по данным бурения, имеется несколько ошибочных утверждений. Наиболее серьезным из них является утверждение об отсутствии мерзлых грунтов в кернах скважин, пробуренных на Крузенштернском лицензионном участке (заливы Шарапов Шар и губа Крузенштерна). При этом на Рисунке 10, приведенном в работе, в рассматриваемой акватории условным знаком показа скважина, вскрывшая мерзлые образования. Также ошибочным является утверждение о газовом выбросе, имевшем место при бурении на Русановском месторождении (при бурении на этом месторождении газопроявления не наблюдались).

Говоря о применении сейсмического профилирования, выполняемого методом отраженных волн, автор обосновано считает сомнительными все интерпретации, отражающих границ с кровлей мерзлых толщ. При этом, утверждается, что метод микросейсмических зондирований позволяет решить эту задачу. Отмечается, что исследования этим методом были выполнены на одном из полигонов в море Лаптевых.

Кроме того, не вполне понятен тезис автора о двухслойном строении вечномерзлых толщ на арктическом шельфе. Вероятно, он провел здесь аналогию с южными районами материковых областей распространения мерзлых пород в Западной Сибири и Печорской низменности, где в осадочной толще действительно выделено два яруса мерзлых пород, сформированных в различное время. Однако, имеющиеся буровые и сейсмические материалы, полученные на арктическом шельфе, категорически противоречат этой гипотезе.

В целом автор отмечает, что в западном секторе российского арктического шельфа мерзлые образования имеют островной характер распространения. Характер распространения мерзлоты в восточном секторе в целом автором не указан. Отмечено лишь, что в южной прибрежной части моря Лаптевых мерзлота имеет сплошной характер распространения, а в его северной части – прерывистый. Указано также, что выделение мерзлых образований в Чукотском море носит проблематичный характер, а по Восточно-Сибирскому морю ни фактов обнаружения мерзлоты, ни соответствующих интерпретаций сейсмических материалов и/или каких-либо соображений (гипотез) на этот счет вообще не приводится.

В целом, несмотря на некоторые ошибки геокриологический очерк в части анализа по морям западного сектора, а также по морю Лаптевых можно считать достаточно

полным. Геокриологические же условия Чукотского и Восточно-Сибирского морей описаны совершенно недостаточно. В оправдание автора можно сказать, что данных по геокриологии этих морей весьма редкие и отрывочные. Возможно, здесь следовало бы, основываясь на редких данных и аналогиях, сформулировать некоторую общую гипотезу о мерзлотных условиях указанных акваторий.

При этом следует отметить, что использованной автором работе А.И. Фартышева значительная часть скважин, по которым он характеризует мерзлые отложения моря Лаптевых, географически пробурены в сопредельной юго-западной части Восточно-Сибирского моря. Поскольку автор является соискателем ученой степени в области географических наук, ему следовало бы обратить на это внимание.

Выводы по данной главе сформированы в виде отдельного раздела (1.9). Эти выводы касаются в основном вопросов интеграции компонентов природных условий в математическую модель автора. Учитывая общее содержание работы такой подход представляется вполне оправданным.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе автор описывает алгоритм своей модели PEGAS (разд. 2.1), ее граничные условия (разд. 2.2, 2.3), устойчивость и сходимость (разд. 2.5). Также описаны процедуры, выполняемые программным модулем MAGAS для фоновой автоматизации расчета равновесных условий (разд. 2.4). Программное обеспечение было составлено самим автором.

В Таблице 4 разд. 2.1 приведены осредненные свойства горных пород (отложений), которые использованы в качестве входных данных для моделирования. Следует отметить, что в этой таблице и нескольких местах в тексте автор не корректно и не ясно использует термины, обозначающие свойства пород. Наиболее существенным здесь является термины, связанные с понятием «скелет породы». В петрофизике, горной механике и инженерной геологии, как в России, так и за рубежом, под «скелетом породы» подразумеваются составляющие породу минеральные частицы и поры между ними, заполненные воздухом. Под «плотностью скелета» понимается плотность сухой породы. Из контекста же следует, что автор под скелетом породы не верно понимает исключительно ее минеральный компонент, а под «плотностью скелета» подразумевает «минеральную плотность» или «плотность частиц грунта».

Также не определенно использован термин «пористость» (безразмерный, выражен в долях). Не ясно какой из показателей пористости автор имел в виду:

- «коэффициент пористости», принятый в горном деле (k_n - отношение объема пор к объему породы), обычно выражается в процентах,
- «пористость», используемый в инженерной геологии (n - аналогичен по смыслу k_n), обычно выражается в процентах,
- «коэффициент пористости» также принятый в инженерной геологии (e - отношение объема пор к объему твердых частиц), обычно выражается в долях.

Очевидно, что было необходимо было указать физический смысл используемых в модели показателей плотности и пористости, используемых в качестве входных данных модели.

К самим значениям показателей замечаний нет, они вполне укладываются в определенные по материалам бурения диапазоны, характерные для отложений верхней части разреза в указанных интервалах.

В авторской модели верхние граничные условия в каждой точке расчетной сетки складываются из придонной температуры морской воды, температуры воздуха и донных отложений. В целом такая гипотеза представляется вполне адекватной. Проведена большая работа по кластеризации температуре арктического шельфа для каждой расчетной точки. Также учтен фактор солености морской воды и выполнена кластеризация по этому признаку для расчетных точек.

Нижние граничные условия модели определяются глубинным тепловым потоком. С целью избежать объектных неопределенностей, связанных с недостаточностью данных и нестационарным характером теплового потока автором было выполнено усреднение или приближенная экстраполяция по данным из открытых баз. Безусловно такой подход снижает адекватность модели, но избежать этого в описанных условиях не представляется возможным.

Замечаний и комментариев к другим разделам данной главы нет.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ PEGAS

Данная глава посвящена в основном описанию результатов моделирования положения области вечной мерзлоты и зон стабильности газогидратов и их верификации по имеющимся натурным данным.

В начале главы автор (разд. 3.1) приводит факторы, которые могут осложнить верификацию модели по скважинным данным. При этом допускается ряд ошибок. В частности, упомянутой здесь «DS-термометрии» не существует. Очевидно, имелась в виду DTS-термометрия (Distributed Temperature Sensing).

Автор утверждает, что граница кровли мерзлых толщ, выделенная по сейсмическим данным, в целом коррелируется с положением кровли вечной мерзлоты, отстроенной по результатам моделирования. Вместе с тем, он отмечает неопределенность интерпретаций сейсмических записей с точки зрения выделения отражающей границы, соответствующей кровле мерзлых толщ. В связи с этим остается не ясным в какой же степени и по каким критериям (глубина залегания кровли мерзлых толщ, их мощность или др.) результаты моделирования соответствуют сейсмическим данным. Возможно, здесь было более правильным сказать, что границы области распространения мерзлых пород, отстроенные по результатам моделирования, соответствуют положению этой области, закартированному по сейсмическим материалам.

Также следовало бы детально сопоставить положения кровли вечной мерзлоты, отстроенное по результатам моделирования и по методу микросейсмических зондирований, который автор считает наиболее подходящим для картирования многолетнемерзлых пород.

При сопоставлении результатов моделирования со скважинными данными автором отмечается их частичное совпадение. Так в Печорском море положение кровли мерзлоты, отстроенной по данным моделирования, совпадает с верхними границами мерзлых интервалов в кернах большинства скважин. При этом в Байдарацкой губе Карского моря границы выделенного здесь по данным бурения реликтового мерзлого массива в картине модели вообще не отображаются. Кровля мерзлой толщи по данным моделирования здесь

залегает на глубинах около 100 м от дна (!), что не соответствует и противоречит фактическим буровым и сейсмическим данным.

В море Лаптевых в заливе Буор-Хая и в акватории около Новосибирских о-вов также отмечаются частичные несоответствия результатов моделирования данным бурения.

Указанные несоответствия объясняются авторам как неоднозначностью скважинных данных, так и погрешностями модели. В целом с этим утверждением можно согласиться, но автор не четко сформулировал величину несоответствий и не определил их критического порога.

В целом очевидно, что соответствие модели данным бурения и сейсмоки далеко не полное. Имеются весьма существенные невязки в оценках положения кровли мерзлых толщ и их мощностей.

К выполненной автором оценке влияния на модель граничных условий (разд. 3.2) замечаний нет. С основными изложенными здесь положениями следует согласиться.

Раздел 3.3 «Прогнозное картирование СММП» содержит ряд серьезных ошибок и неточностей. В частности автор утверждает, что мерзлые льдистые отложения на шельфе Печорского моря и юго-западной части Карского моря вообще отсутствуют, а встречающиеся локальные мерзлые массивы являются аномалиями. В чем заключается их аномальность он не указал. Очевидно, данное утверждения совершенно ошибочно. Данная ошибка усугубляется в ЗАКЛЮЧЕНИИ, где сказано о том, Печорское море, наряду с Чукотским, «освободилось» от вечной мерзлоты.

В ряде опубликованных работ показано, что мерзлые льдистые массивы имеют островной характера распространения и входят в состав реликтовой криолитозоны наряду с разделяющими их таликами. Моделирование и скважинная термометрия показывают, что отложения таликов имеют температуру, близкую по своим значениям к температуре фазового перехода. В отложениях, насыщенных засоленным поровым раствором, эта температура остается отрицательной. При этом охлажденные отложения с отрицательной температурой, но не содержащие в своем составе лед, развиты весьма широко. Об аномальности условий в определенной мере можно говорить лишь применительно к объекту «Диапиры».

Кроме того, основываясь на фактах обнаружения мерзлых пород при глубинах моря менее 40 м автор утверждает, что эти образования могли быть сформированы при предпоследней (!) поздненеоплейстоценовой регрессии (МИС-5а). Это утверждение также ошибочно и противоречит общепринятой точке зрения, которая обоснована фактическими данными и моделированием. В соответствие с ней реликтовые многолетнемерзлые породы образовались исключительно во время последней поздненеоплейстоценовой регрессии и/или при более поздних эпизодических неглубоких регрессиях. Более древние мерзлые образования на шельфе к сегодняшнему дню полностью деградировали. Каких-либо серьезных доводов, опровергающих данную точку зрения, автор не приводит.

Также автор в целом безосновательно утверждает, что в северо-западной части Карского моря развиты мощные и устойчивые мерзлые толщ (под устойчивостью он, вероятно, полагает непрерывность). При этом, согласно приведенным им же материалам в разд. 1.6, данная акватория при последней регрессии была перекрыта ледниковым щитом, что, очевидно, препятствовало промерзанию. Кроме того, «северо-западной части» Карского моря не существует. Согласно Лоции и др. в Карском море выделяются юго-

западная и северная части, что значимо для соискания степени в области географических наук.

В целом авторская модель распространения мерзлых пород весьма неточная и не вполне адекватная по отношению к имеющимся данным. Она может быть использована лишь для весьма приближенных прогнозов и общих иллюстраций. Очевидно, что допущенные автором неточности и ошибки во многом связаны с отсутствием в работе внятного очерка геокриологических условий и отсутствием достаточно полных материалов о температуре мерзлых и протаявших отложений.

К разд. 3.4 «Прогноз распространения ЗСГГ по базовой модели PEGAS» замечаний в части методики и результатов нет. Однако, и здесь имеются достаточно спорное утверждение (со ссылкой на работу Смирнов и др., 2025) о невозможности формирования газогидратных залежей при мощностях осадочного чехла менее 500 м в связи с малым потенциалом газогенерации и, соответственно, недостаточности источников газа.

Касаясь вопроса источника газа, представляется несколько странным, учитывая тематику работы, что автор оставил практически не затронутым вопрос о наличии в области реликтовой криолитозоны свободного приповерхностного газа.

Также необходимо отметить, что согласно имеющимся фактическим данным (в т.ч. опубликованным) и общепризнанным моделям (см. модель Остеркампа (Osterkamp) и др.) в таликовых зонах, где лед полностью протаял, в большей части промерзавшего интервала температура остается в основном отрицательной или околонулевой, хотя и превышающей температуру начала замерзания. Это делает допущения автора о существовании постмерзлотных криогенных газовых гидратов достаточно обоснованными (в т.ч. и в районах, где мерзлые отложения протаяли).

К главе 4. «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ PEGAS+PELTIER» и нумерованной главе «ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЗСГГ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИКИ ПО МОДЕЛИ PEGAS+PELTIER» замечаний нет.

В целом, несмотря на все указанные ошибки и неточности, представленная работа несомненно представляет теоретический и практический интерес. Ограничения основной модели зоны стабильности газогидратов сформулированы в основном правильно, ее достоверность оценивается как приближенная к истинной природной ситуации. Отмеченные недостатки главным образом связаны с отсутствием достаточного количества данных о геокриологических условиях региона в целом и о температурном режиме в частности.

Несомненная ценность или достоинство разработанной автором модели заключается, по мнению оппонента, в возможности ее дальнейшего развития за счет коррекций по новым данным и уточнения за счет исправления ошибок и неточностей.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Обоснованность защищаемых положений:

1. Математические модели условий стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе с учетом современной климатической зональности и динамики ледниковых покровов верхнего плейстоцена, реализованные в программных комплексах PEGAS и PEGAS+Peltier - **обосновано.**

2. Региональные особенности залегания и временной динамики субаквальных многолетнемерзлых пород и зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, выявленные на основе численного моделирования и анализа результатов геолого-геофизических исследований – **частично обосновано, имеются неопределенности, касающиеся динамики субаквальной мерзлоты.**
3. Специфические типы «постмерзлотных» и «постледниковых» зон стабильности криогенных газовых гидратов на российском арктическом шельфе, выделенные на основе численного моделирования, характеризующиеся их формированием в верхнем плейстоцене и частичным сохранением в современных условиях – **обосновано.**

Диссертационная работа Юрия Юрьевича Смирнова «Временная динамика зон стабильности криогенных газовых гидратов на шельфе российских морей» 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.

Ведущий геолог Комплексной
Инженерно-Геологической Партии
АО «Арктические Морские Инженерно-
Геологические Экспедиции»,
канд. геогр. наук

Рокос Сергей Игоревич



«18» декабря 2025г.

Подпись Рокос С.И.

Главный геолог «АМИГ»
Соколов П.В. П.С.

Согласие на обработку персональных данных

Я, Рокос Сергей Игоревич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку, в том числе на размещение их в сети Интернет.

«18» декабря 2025 г.



Рокос С.И.