

УДК 551.242

ВОЗМОЖНЫЙ СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭМИССИИ МЕТАНА, РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ

© 2023 г. Л. И. Лобковский^{1, 2, *}, А. А. Баранов³, М. М. Рамазанов⁴, И. С. Владимирова^{1, 2},
Ю. В. Габсатаров^{1, 2, **}, Д. А. Алексеев^{1, 2}

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁴Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал Объединенного института высоких
температур РАН, г. Махачкала, Россия

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

**E-mail: yuryg@gsras.ru

Поступила в редакцию 20.09.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе в конце 70-х годов 20-го в., вызвавшей начало резкого потепления климата в Арктике, а также интенсивного разрушения покровно-шельфовых ледников Западной Антарктиды в конце 20-го и начале 21-го в., сопровождаемого выделением метана из подстилающих гидратсодержащих осадочных пород и быстрым потеплением климата в Антарктиде. Данный механизм связан с действием деформационных тектонических волн в системе литосфера–астеносфера, вызванных сильнейшими землетрясениями, происходящими в наиболее близко расположенных к полярным областям зонах субдукции: Алеутской, находящейся в северной части Тихого океана, Чилийской и Кермадек–Маккуори, расположенных в юго-восточной и юго-западной частях Тихоокеанской литосферы. Возмущения литосферы передаются со средней скоростью около 100 км/год на большие расстояния порядка 2000–4000 км и связанные с ними добавочные напряжения, приходящие в Арктику и Антарктиду через несколько десятков лет после землетрясений, приводят к разрушению метастабильных газогидратов, находящихся в мерзлых породах арктического шельфа или в подледных осадочных породах Антарктиды, вызывая парниковый эффект потепления, а также к уменьшению сцепления покровных ледников с подстилающими породами, ускоренному их скольжению и разрушению покровно-шельфовых ледников Антарктики. Рассмотренная гипотеза приводит к выводу, что в грядущие десятилетия процессы разрушения ледников и потепления климата в Антарктиде будут нарастать из-за беспрецедентного роста числа сильнейших землетрясений в зонах субдукции юга Тихого океана в конце 20-го и начале 21-го веков.

Ключевые слова: Западная Антарктида, разрушение ледников, эмиссия метана, потепление климата, сильнейшие землетрясения, зоны субдукции южной части Тихоокеанской литосферы, тектонические волны, триггерный механизм, метастабильные газогидраты.

DOI: 10.31857/S0002333723030080, EDN: KAGWQS

ВВЕДЕНИЕ

Полярные регионы Земли — Арктика и Антарктика — являются наименее изученными областями нашей планеты, что связано с их труднодоступностью и суровыми климатическими условиями. В то же время, эти регионы играют особую роль в климатической системе нашей планеты, поскольку в процессе глобального потепления температура их атмосферы растет заметно быст-

рее, чем в других областях Земли. Проблема глобального потепления климата представляет собой один из экзистенциальных вызовов современной цивилизации. При ее обсуждении обычно доминирует точка зрения об антропогенной причине этого явления, связанной с промышленными выбросами углекислого газа в атмосферу, создающего парниковый эффект. Тем не менее, остается ряд вопросов, не нашедших удовлетворительного объяснения в рамках антро-

погенной парадигмы. Один из них касается причины возникновения резкого роста температуры на Земле, начавшегося в конце 70-х годов прошлого века и наиболее ярко проявляющегося в Арктике и Антарктике. Антропогенную версию объяснения данного феномена трудно принять, поскольку в конце 70-х годов заметного роста мирового промышленного производства, приводящего к повышенным выбросам углекислого газа, отмечено не было. Другая глобальная проблема состоит в потенциальной возможности подъема уровня Мирового океана на десятки сантиметров в результате разрушения крупных покровных ледников Антарктиды, их быстрого сползания с материкового склона и погружения в морскую воду. Повышенное внимание к этой проблеме обусловлено небывалым ростом интенсивности разрушения шельфовых ледников Западной Антарктиды, наблюдаемым с конца прошлого века по настоящее время. Резкое потепление Антарктиды, сопровождаемое интенсивным разрушением ледников, обычно объясняют воздействием теплых воздушных потоков и морских течений, несущих теплый воздух и воду из южных частей Тихого океана [Wille et al., 2022]. В этой связи, как и в случае с Арктикой, возникает вопрос: почему эти процессы начались именно в конце прошлого века и набирают свою силу в текущем столетии? Обычное объяснение этого факта сводится к тезису об антропогенном воздействии промышленных выбросов углекислого газа, создающих парниковый эффект и глобальное потепление климата. Не вдаваясь здесь в дискуссию о соотношении антропогенных и природных факторов изменения климата, отметим, что в последнее время доминирующая антропогенная концепция глобального потепления все чаще стала подвергаться сомнению. В качестве примера отметим недавно появившийся манифест международного независимого фонда Global Climate Intelligence Group, который подписали более 1200 ученых и экспертов со всего мира, где констатируется, что известные климатические модели имеют слишком много недостатков и поэтому не подходят в качестве основы для политического планирования [World ..., 2022].

В настоящей статье рассматривается альтернативный геодинамический подход, основанный на предложенной в работах [Лобковский, 2020; Lobkovsky, 2020; Lobkovsky et al., 2022; Лобковский и др., 2023] сейсмогенно-триггерной гипотезе резкой активизации эмиссии метана на арктическом шельфе, вызванной деформационными волнами, возбужденными сильнейшими землетрясениями, произошедшими в середине 20-го века в Алеутской зоне субдукции. Развивая этот подход, мы исходим из общего представления о деформационных волнах, приходящих на Аркти-

ческий шельф из ближайшей к нему Алеутской зоны субдукции на севере Тихого океана, а в Антарктику – из ближайших к ней зон субдукции южной части Тихого океана: Чилийской и Кермадек-Маккуори. Предполагается, что деформационные волны, возбуждаемые происходящими в указанных зонах субдукции сильнейшими землетрясениями, за счет триггерных механизмов приводят к повышенной эмиссии метана в полярных регионах, создающей парниковый эффект потепления среды, а также к интенсивному разрушению ледников Западной Антарктиды.

СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНАЯ СХЕМА РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ И ЭМИССИИ МЕТАНА

Рассмотрим принципиальную схему сейсмогенно-триггерного механизма разрушения метастабильных газогидратов, находящихся в мерзлых породах осадочного бассейна, расположенного на значительном расстоянии порядка первых тысяч километров от зоны субдукции. Этот механизм был впервые предложен для Арктического шельфа и Алеутской островной дуги в работах [Лобковский, 2020; Lobkovsky, 2020]. На рис. 1. показаны три стадии последовательной реализации данного механизма. *Первая стадия* связана с возникновением сильнейшего землетрясения в зоне субдукции с магнитудой больше 8 или серии близких по времени (в интервале нескольких лет) сильнейших землетрясений с таким же уровнем магнитуды. *Вторая стадия* характеризуется возникновением деформационной волны, вызванной сильнейшим землетрясением в зоне субдукции и распространяющейся горизонтально в сторону осадочного бассейна в системе “упругая литосфера–вязкая астеносфера”. Наконец, *третья стадия* отвечает процессу разрушения метастабильных газогидратов, находящихся в мерзлых осадочных породах, внешними добавочными напряжениями, принесенными деформационной волной в область осадочного бассейна. Разрушение газогидратов приводит к освобождению запертого в них метана, его фильтрации сквозь трещиновато-пористую среду мерзлых пород и эмиссии в атмосферу, создавая парниковый эффект, повышающий температуру окружающей среды. Таким образом, рассматриваемая здесь схема включает два различных геомеханических процесса: 1) деформационные волны, выполняющие роль внешней триггерной нагрузки на газогидраты; 2) собственно процесс разрушения газогидратов и фильтрации освобожденного газа через трещиновато-пористую среду.

Рассмотрим кратко указанные процессы применительно к нашей схеме. В теоретическом плане проблема распространения напряжений в ли-

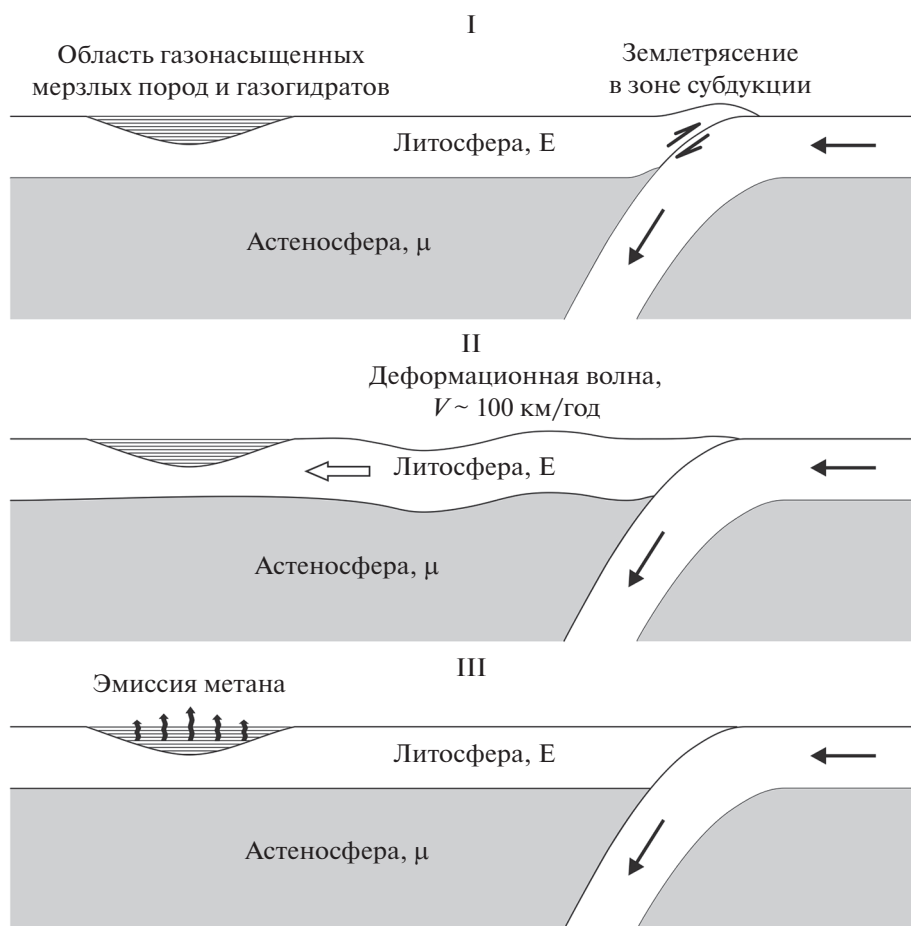


Рис. 1. Сейсмогенно-триггерная схема разрушения газогидратов и эмиссии метана деформационными волнами, вызванными сильнейшими землетрясениями в зоне субдукции.

тосфере была впервые рассмотрена в работе В. Эльзассера [Elsasser, 1969]. Скорости “диффузии” упругих смещений или напряжений в этой модели оказались очень медленными по сравнению со скоростями сейсмических волн и составляли порядка нескольких десятков км/год. Однако именно такие скорости были характерны для миграции сейсмической активности, наблюдаемой в различных регионах Земли и в условиях разных геодинамических обстановок. С этим обстоятельством связан повышенный интерес геофизиков к данной проблеме, проявившийся в большом количестве публикаций по данной тематике. Современное состояние исследований в этом направлении отражено в статье [Быков, 2018]. На сегодняшний день существуют различные модели распространения напряжений и деформаций в литосфере и ее отдельных тектонически активных зонах (зонах субдукции, коллизии, трансформных разломах, разломно-блоковых внутриплитных областях) [Anderson, 1975; Bott, Dean, 1973; Melosh, 1976; Rice, 1980; Биргер, 1989; Николаевский, 1995; 1996; Кузьмин, 2012; 2020;

Кочарян и др., 2014; Вуков, 2015; Ружич и др., 2016].

Наиболее важный аспект нашей схемы заключается в новом приложении теории деформационных волн в плане их триггерного воздействия на метастабильные газогидраты, приводящего к эмиссии метана. Существенная особенность рассматриваемой модели состоит в том, что деформационные волны, вызванные сильнейшими землетрясениями в зоне субдукции, должны проходить большие расстояния порядка первых тысяч километров без значительного затухания, чтобы иметь возможность привести в действие триггерный механизм разрушения газогидратов. В “диффузионных” моделях эльзассеровского типа имеет место затухание возмущений напряжений и деформаций на расстояниях порядка первых сотен километров [Elsasser, 1969; Anderson, 1975; Melosh, 1976]. Поэтому эти модели не подходят для обоснования триггерного механизма эмиссии метана. Однако существуют модели слабо затухающих деформационных тектониче-

ских волн, в которых учитываются не только механические возмущения литосферы, но и тепловые эффекты, связанные с фазовым переходом на границе литосфера–астеносфера, где происходит частичное плавление вещества литосферы или, наоборот, кристаллизация частично расплавленного вещества астеносферы [Гарагаш, Лобковский, 2021; Лобковский, Рамазанов 2021]. Было показано, что при известных геофизических параметрах геосреды в системе “упругая литосфера–вязкая астеносфера” существуют термомеханические деформационные волны со слабым затуханием, которые обеспечивают возникновение значительных добавочных напряжений порядка 0.1 МПа в литосфере на расстояниях порядка первых тысяч километров от места генерации волн при средней скорости распространения волн порядка 100 км/год [Лобковский, Рамазанов, 2021].

Рассмотрим другой процесс, на котором базируется сейсмогенно-триггерная схема, а именно: разрушение метастабильных газогидратов, находящихся в мерзлых породах осадочного бассейна, под действием триггерного эффекта внешних дополнительных напряжений, связанных с деформационными волнами. Как известно, газогидраты, представляющие собой кристаллические соединения газа и воды, широко распространены в осадочной толще в районах вечной мерзлоты на суше и глубоководных частях морей и океанов, где имеют место относительно высокие давления и низкие температуры, необходимые для образования и стабильного существования гидратов [Chuvilin et al., 2013; Матвеева, 2018]. Процесс аккумуляции газогидратов при осадконакоплении в субаквальных условиях в рамках математической модели рассмотрен в работе [Суетнова, 2007]. По существующим оценкам глобальные запасы газовых гидратов насчитывают около 1000 миллиардов метрических тонн углерода [Wallmann et al., 2012], разложение которого может повлиять на круговорот углерода и климат в глобальном масштабе [Dickens et al., 1995; Maslin et al., 2004; Ruppel, Kessler, 2017].

Анализ глобального потока метана в межгеосферном газообмене показывает большую роль глубинного потока метана, идущего из недр Земли [Адушкин и др., 2003]. Идея возможной диссоциации газогидратов и эмиссии метана, обладающего сильным парниковым эффектом, использовалась для объяснения целого ряда известных явлений, таких как палеоценовый тепловой максимум [Dickens et al., 1995] или быстрое последующее увеличение содержания атмосферного метана [Kennett et al., 2003]. Обсуждается также общая гипотеза о возможном влиянии эмиссии метана на глобальное потепление при усилении процессов деградации мерзлоты и диссоциации газогидратов [Kvenvolden, 1988; Koven et al., 2011;

Shakhova et al., 2017; Сергиенко и др., 2012; Лобковский, 2020; Lobkovsky, 2020].

Многолетние морские исследования арктического шельфа России показали, что со дна мелководных областей в морях Восточной Арктики происходит значительный выброс метана [Shakhova et al., 2017; Сергиенко и др., 2012; Chuvilin et al., 2018]. Среди многочисленных природных и техногенных газовых проявлений на суше Арктической зоны особое место занимают крупные кратеры, возникшие в результате мощных газовых выбросов [Leibman et al., 2014; Kizyakov et al., 2020; Chuvilin et al., 2020; Bogoyavlensky et al., 2021].

Обычно диссоциацию газогидратов связывают с повышением температуры до критического уровня, при достижении которого теряется стабильность существования газогидратов при данном давлении окружающей среды, отвечающем определенной глубине залегания гидратного слоя. Такое повышение температуры гидратного слоя может быть связано либо с эндогенными процессами, например, с нагретыми флюидами, мигрирующими по разломам коры из более глубоких горизонтов литосферы [Баранов и др., 2019], либо с экзогенными факторами, например, с теплыми придонными течениями на шельфе или трансгрессиями водных масс на холодную поверхность суши в Арктике [Shakhova et al., 2017]. Однако потеря устойчивости газогидратов может быть также связана с понижением внешнего давления, вызванного геодинамическими факторами. К таким факторам, например, относится уменьшение гидростатического давления воды на шельфе в результате его обмеления, вызванного изостатическим подъемом поверхности коры из-за таяния ледников, как это установлено для архипелага Шпицберген в Восточной Арктике [Wallmann et al., 2018]. Отмеченные тепловые и геодинамические факторы действуют, как правило, в коротких геологических масштабах времени в пределах голоцена.

Однако существуют и быстродействующие геодинамические факторы, приводящие при определенных условиях к практически мгновенной диссоциации газогидратов. К ним, в частности, относятся деформационные волны в литосфере. Последние могут играть важную триггерную роль в процессе нарушения метастабильного равновесия реликтовых газогидратов, испытывающих частичную диссоциацию, которая, как показывают эксперименты [Davidson et al., 1986; Yakushev, Istomin, 1992], едва начавшись, может быстро прекратиться в результате образования пленок льда, запечатывающих возникший свободный газ внутри газогидратных микрочастиц, приводя к явлению самоконсервации газогидратов [Яку-

шев, 2009; Chuvilin et al., 2013; 2018]. В дальнейшем находящиеся длительное время в условиях самоконсервации метастабильные реликтовые газогидраты могут разрушиться при возникновении дополнительных напряжений, разрушающих тонкие пленки льда, освобождая таким образом свободный газ и приводя к его фильтрации в трещиновато-пористой среде мерзлых пород и, в конечном счете, к эмиссии метана в атмосферу. Анализ механики этого процесса был выполнен в ряде работ [Баренблатт и др., 2016; Лобковский, Рамазанов, 2019; 2021].

Описанная схема лежит в основе сейсмогенно-триггерной гипотезы, которая связывает рост эмиссии метана и наступление фазы современного потепления климата в Арктике в 1979–1980 гг. с аномально высокой сейсмической активностью в Алеутской зоне субдукции, наблюдаемой примерно за 20 лет до начала потепления [Лобковский, 2020; Lobkovsky, 2020]. В следующем разделе кратко излагаются исходные данные, лежащие в основе этой гипотезы.

СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНАЯ ГИПОТЕЗА ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Для подтверждения выдвигаемой гипотезы необходимо прежде всего убедиться в наличии пространственно-временной корреляции между сильнейшими землетрясениями и наблюдаемыми климатическими изменениями. На рис. 2 показаны в сопоставлении график изменения средней температуры в Арктике на протяжении 20-го и начала 21-го веков и ход выделения сейсмической энергии Земли, определяемой, главным образом, сильнейшими землетрясениями с магнитудой больше 8.

Из этого сопоставления отчетливо видно, что наибольшая часть сейсмической энергии Земли была выделена во временном интервале 1952–1965 гг. К этому интервалу приурочена самая мощная серия сильнейших землетрясений в Алеутской дуге (ближайшей к Арктическому шельфу): это сильнейшее землетрясение 1957 г., произошедшее в центральной части дуги с магнитудой $M = 8.6$, далее сильнейшее землетрясение 1964 г., произошедшее на восточном конце дуги с предельной магнитудой $M = 9.2$ (Аляскинское землетрясение) и, наконец, сильнейшее землетрясение 1965 г. в западной части дуги с магнитудой $M = 8.7$. После этих событий в Алеутской островной дуге не было сильнейших землетрясений с магнитудой порядка 8 вплоть до наших дней за исключением одного события с $M = 8.0$, произошедшего в центральной части дуги в 1986 г. К этим сейсмическим событиям естественно добавить близко расположенный к Алеутской дуге очаг сильнейшего Северо-Курильского земле-

трясения с магнитудой 9.0, которое произошло в 1952 г. в северной части Курильской островной дуги. Таким образом, всплеск беспрецедентной сейсмической активности в Алеутской дуге произошел примерно за 15–20 лет до наступления фазы резкого потепления климата (1978–1980 гг.). Такое временное запаздывание естественно объяснить скоростью распространения деформационных волн в системе “упругая литосфера–вязкая астеносфера” порядка 100 км/год [Elsasser, 1969; Melosh, 1976; Быков, 2018; Гарагаш, Лобковский, 2021; Лобковский, Рамазанов, 2021], поскольку за это время волны проходят расстояние около 2000 км между арктическим шельфом и Алеутской дугой.

Как отмечалось выше, вследствие триггерного воздействия добавочных напряжений деформационных волн на метастабильные газогидраты, находящиеся в мерзлых породах арктического шельфа, последние будут подвержены разрушению, что приведет к освобождению запертого в гидратах метана, его фильтрации и эмиссии в атмосферу, вызывая парниковый эффект и потепление окружающей среды. Таков альтернативный по отношению к антропогенной точке зрения геодинамический механизм потепления климата в Арктике.

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА И ФАЗАМИ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЫ

Аналогичный сейсмогенно-триггерный механизм, как предполагается, работает и для Антарктики. Здесь наступление фазы аномального потепления климата произошло практически синхронно с Арктикой (как и на всем земном шаре). На рис. 2 видно, что в интервал максимального выделения сейсмической энергии Земли попадает самое мощное за всю историю наблюдений землетрясение с магнитудой 9.5, которое произошло в 1960 г. в центральной части Чилийской зоны субдукции, регионально находящейся в относительной близости к Антарктиде (аналогично Алеутской дуге, расположенной в относительной близости к Арктическому шельфу). При этом важно отметить, что особенно заметный рост температуры в Антарктиде стал фиксироваться в последние десятилетия на фоне резкой активизации разрушения и откалывания покровно-шельфовых ледников, в первую очередь, в районе Антарктического полуострова, где активному разрушению подверглись ледники Ларсена (А, В, С), выходящие к морю Уэдделла, ледники Уилкинса и Георга VI с обратной стороны полуострова, ледник моря Росса и некоторые другие ледники.

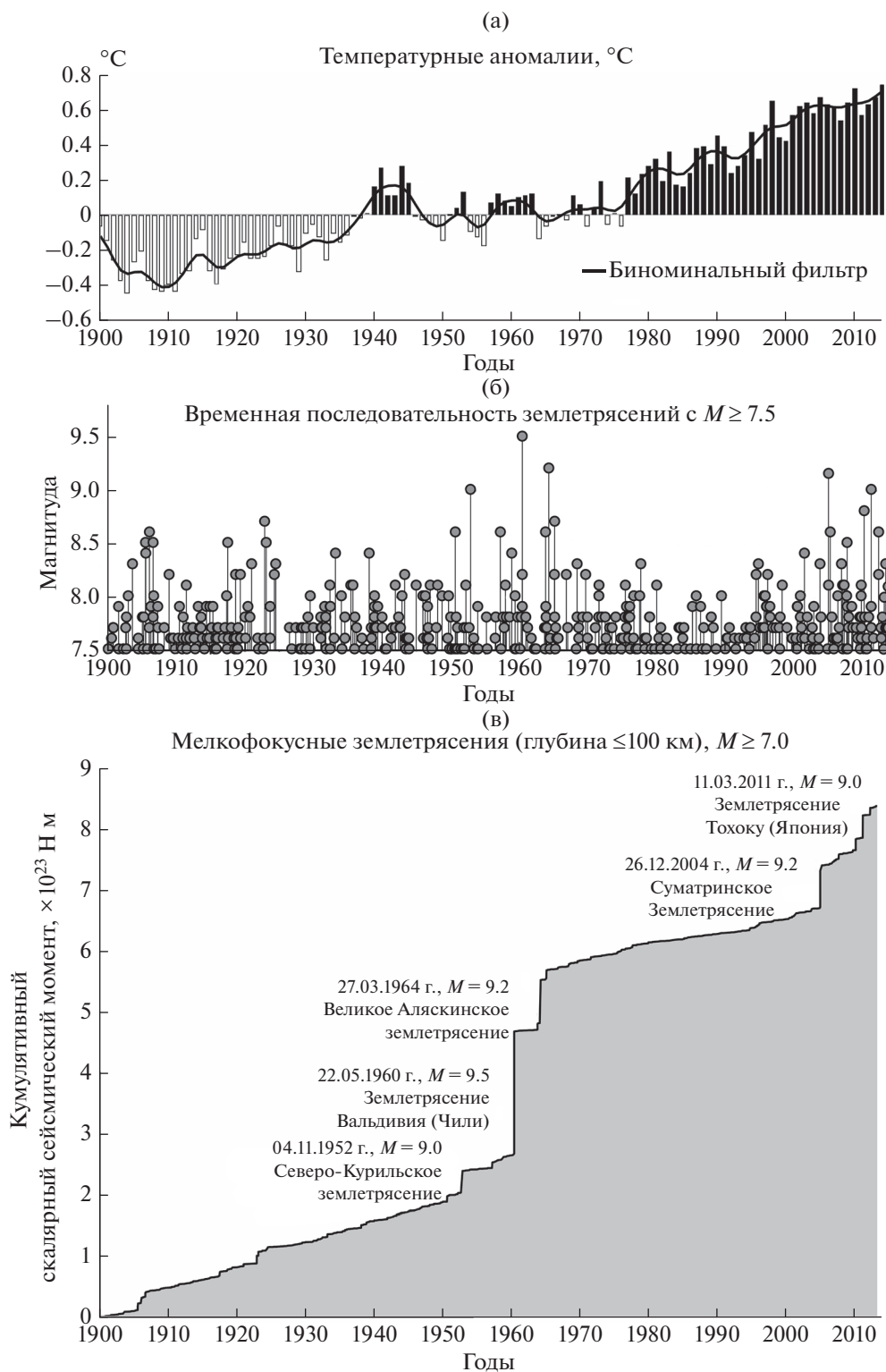


Рис. 2. Сопоставление графиков изменения средней температуры в Арктике на протяжении 20-го и начала 21-го веков и выделения сейсмической энергии Земли (по работам [Lau, 2015; Climate ..., 2022], модифицировано).

Заметим, что в последнее время в Антарктиде наблюдается значительное потепление климата, сопоставимое с Арктическим. Так за последние

полвека температура на Антарктическом полуострове возросла более чем на 2°C [Marshall et al., 2006; Cook, Vaughan, 2010; Climate ..., 2022; Chris-

tie et al., 2022]. В Западной Антарктиде температура начала быстро расти с конца 70-х годов прошлого века, потепление там продолжается и в наши дни, сопровождаясь заметным сокращением плавучих льдов. Большинство исследователей предполагает, что в связи с потеплением в Западной Антарктиде началось интенсивное разрушение шельфовых ледников в акваториях морей Уэдделла, Беллинсгаузена и Росса, которые были стабильны на протяжении последнего тысячелетия [Christie et al., 2022]. Резкое потепление Антарктиды, сопровождаемое интенсивным разрушением ледников, обычно объясняют воздействием теплых воздушных потоков и морских течений, несущих теплый воздух и воду из южных частей Тихого океана [Wille et al., 2022]. Объяснение этих явлений антропогенным воздействием промышленных выбросов углекислого газа, создающих парниковый эффект, представляется не слишком убедительным, учитывая удаленность Антарктики от мировых центров промышленного производства.

Рассматриваемая в данной работе альтернативная гипотеза основана на сейсмогенно-триггерном механизме воздействия деформационных тектонических волн, вызванных сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции южной части Тихого океана (Чилийской и Кермадек-Маккуори), которые достигнув Антарктиды, приводят к резкому ускорению движения и разрушения ледников, что, в свою очередь, инициирует процесс высвобождения метана из газогидратов, расположенных в подледных осадочных породах, и его последующего выхода в атмосферу.

Для обоснования выдвинутой гипотезы рассмотрим пространственно-временную корреляцию между сильнейшими землетрясениями, произошедшими в южно-тихоокеанских зонах субдукции, и фазами разрушения ледников Антарктического полуострова в Западной Антарктиде. На рис. 3 показана карта высот поверхности Антарктического полуострова, на которой отмечены темно-серым цветом сегодняшние крупнейшие шельфовые ледники: Ларсен (32000 км²); Георг VI (24000 км²) и Уилкинс (10000 км²), белым цветом показано море без шельфового льда.

На рис. 4 показаны районы сильнейших землетрясений, произошедших в интервалы времени 1960–2000 гг. (рис. 4а) и 2001–2022 гг. (рис. 4б) в окружающих Антарктиду зонах субдукции литосферы южной части Тихого океана – Чилийской и Тонга-Кермадек-Маккуори.

Современная хронология разрушения ледников начинается с северного блока А ледника Ларсена (рис. 3), который был разрушен в 1995 г. Наиболее близко расположенной к Антарктическому полуострову зоной субдукции, генерирую-

щей сильнейшие землетрясения, является Чилийская зона, где в 1960 г. произошло самое мощное за всю историю инструментальных наблюдений мегаземлетрясение с предельной магнитудой $M = 9.6$ (рис. 4а). В том же 1960 г. примерно в той же части зоны субдукции произошли еще два сильнейших землетрясения с $M = 8.6$ и 8.3 (рис. 4а).

Исходя из сейсмогенно-триггерного механизма, можно предположить, что вызванные данными событиями тектонические волны, распространяющиеся со скоростью около 100 км/год, дойдя до Антарктического полуострова, привели к разрушению северного блока А ледника Ларсена, произошедшему в 1995 г., т.е. через 35 лет после указанных сильнейших землетрясений 1960 г. (рис. 4а). Этот временной лаг соответствует расстоянию около 3300 км между очагами землетрясений и северной оконечностью Антарктического полуострова, которое проходит тектоническая волна при скорости порядка 100 км/год. Разрушение ледника Уилкинса в 1998 г. также может быть связано с тектоническими волнами от землетрясений 1960 г. в Чили. Запаздывание на три года по сравнению с разрушением ледника Ларсен-А может быть обусловлено тем, что ледник Уилкинса лежит юго-западнее ледника Ларсен-А и поэтому тектоническая волна пришла туда позднее (рис. 3). Отметим, что несколько меньший временной сдвиг для Арктики, который оценивался в 20 лет [Лобковский, 2020], предположительно связан с меньшим расстоянием от очагов сильнейших землетрясений в Алеутской зоне субдукции до Арктического шельфа (около 2000 км) по сравнению с расстоянием от очагов Чилийских землетрясений до ледника Ларсена в Антарктиде.

Следующий акт разрушения ледника Ларсена состоялся в 2002 г. в сегменте В, примыкающем с юга к блоку А (рис. 3) [Scambos et al., 2004]. Если считать, что временной сдвиг между источником возбуждения тектонической волны и ее приходом в зону разрушения ледника, как и в предыдущем случае, составляет примерно 35 лет, то такой потенциальный источник существует в Чилийской зоне субдукции – это сильнейшее землетрясение с магнитудой $M = 8.1$, произошедшее здесь в 1966 г. (рис. 4а).

В 2010 г. произошло откалывание большого айсберга от ледника Георга VI. Запаздывание разрушений ледника Георга VI относительно разрушений его соседа ледника Уилкинса может быть объяснено его большей стабильностью из-за нахождения в узком проливе. В дальнейшем ледник Ларсен-В подвергся еще одной фазе разрушения в 2022 г.

Шельфовый ледник Ларсен-С испытал необычный всплеск повышения температуры среды и поверхностного таяния в конце лета 2015 г.

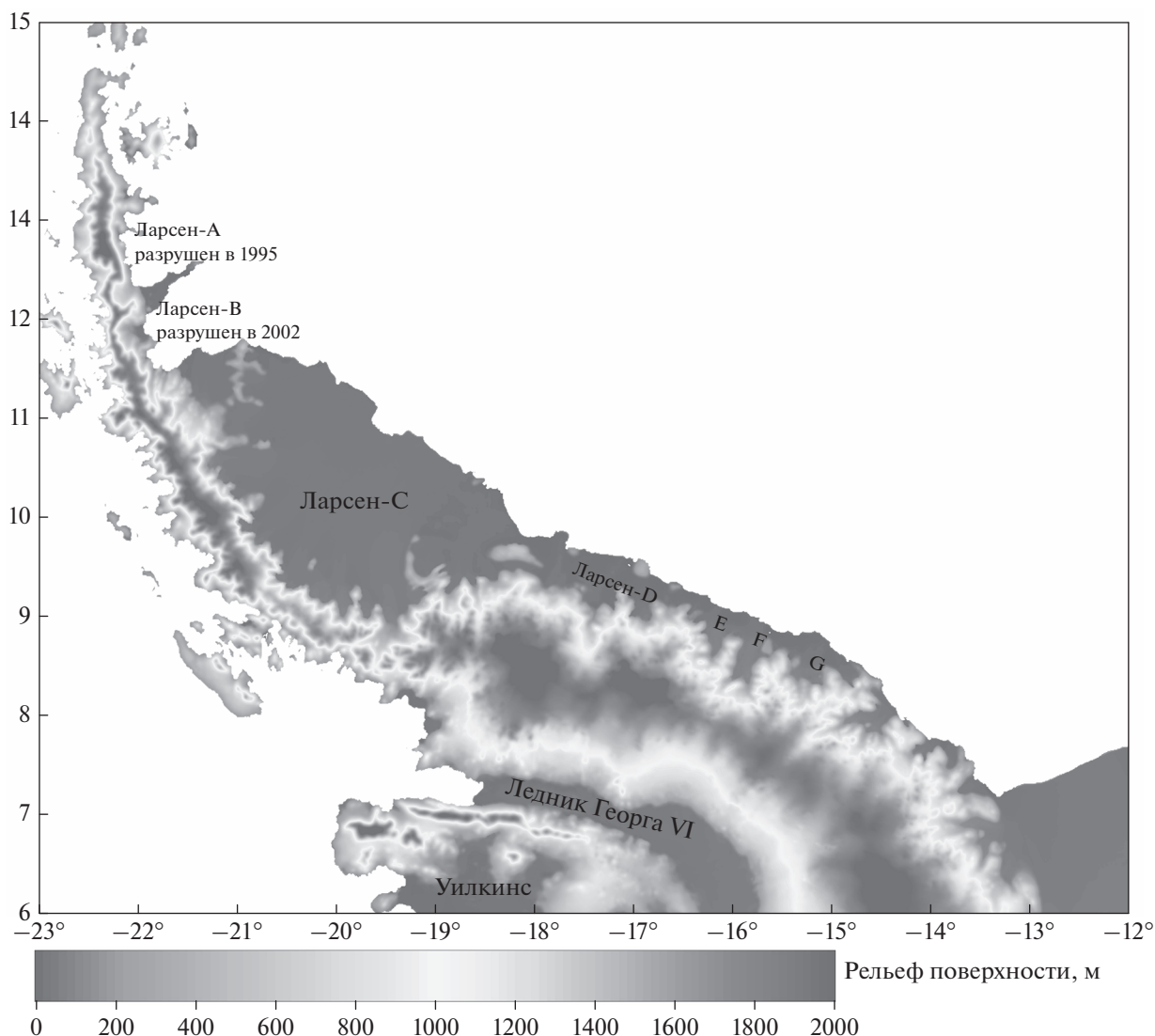


Рис. 3. Карта надводной поверхности Антарктического полуострова.

В 2017 г. от этого ледника отколовся огромный айсберг [Wang et al., 2022]. Эти события можно связать с сильнейшим землетрясением с магнитудой $M = 8.0$, произошедшим в Чилийской зоне субдукции в 1985 г., т.е. время запаздывания здесь составляет около 30 лет (рис. 4а).

Исходя из общей концепции сейсмогенно-триггерного механизма, интересно проследить связь между сильнейшими землетрясениями в самом южном сегменте зоны субдукции юго-западной части Тихоокеанской плиты и разрушением наиболее близко расположенного к этому сегменту шельфового ледника Росса (рис. 4а). В 2000 г. от него отколовся самый крупный за всю историю наблюдений айсберг. В рамках сейсмогенно-триггерного подхода это событие можно связать с сильнейшим землетрясением с магнитудой $M = 8.0$,

произошедшим в 1989 г. южнее Новой Зеландии в районе острова Маккуори (расстояние ~ 3100 км, $M = 8.0$) (рис. 4а). Меньшее время запаздывания (11 лет), связанное с приходом тектонической волны, по сравнению с геодинамическими системами “Алеутская дуга–Арктический шельф” (около 20 лет) или “Чилийская зона субдукции – Антарктический полуостров” (30–35 лет) в рамках рассматриваемой модели [Лобковский, Рамазанов, 2021] обусловлено отличием реологических параметров литосферы и астеносферы в разных регионах, определяющих скорость распространения тектонических волн, в частности, относительно более низкой вязкостью астеносферы в области между Новой Зеландией и Антарктидой.

В последние десятилетия произошло несколько сильнейших землетрясений в южной части

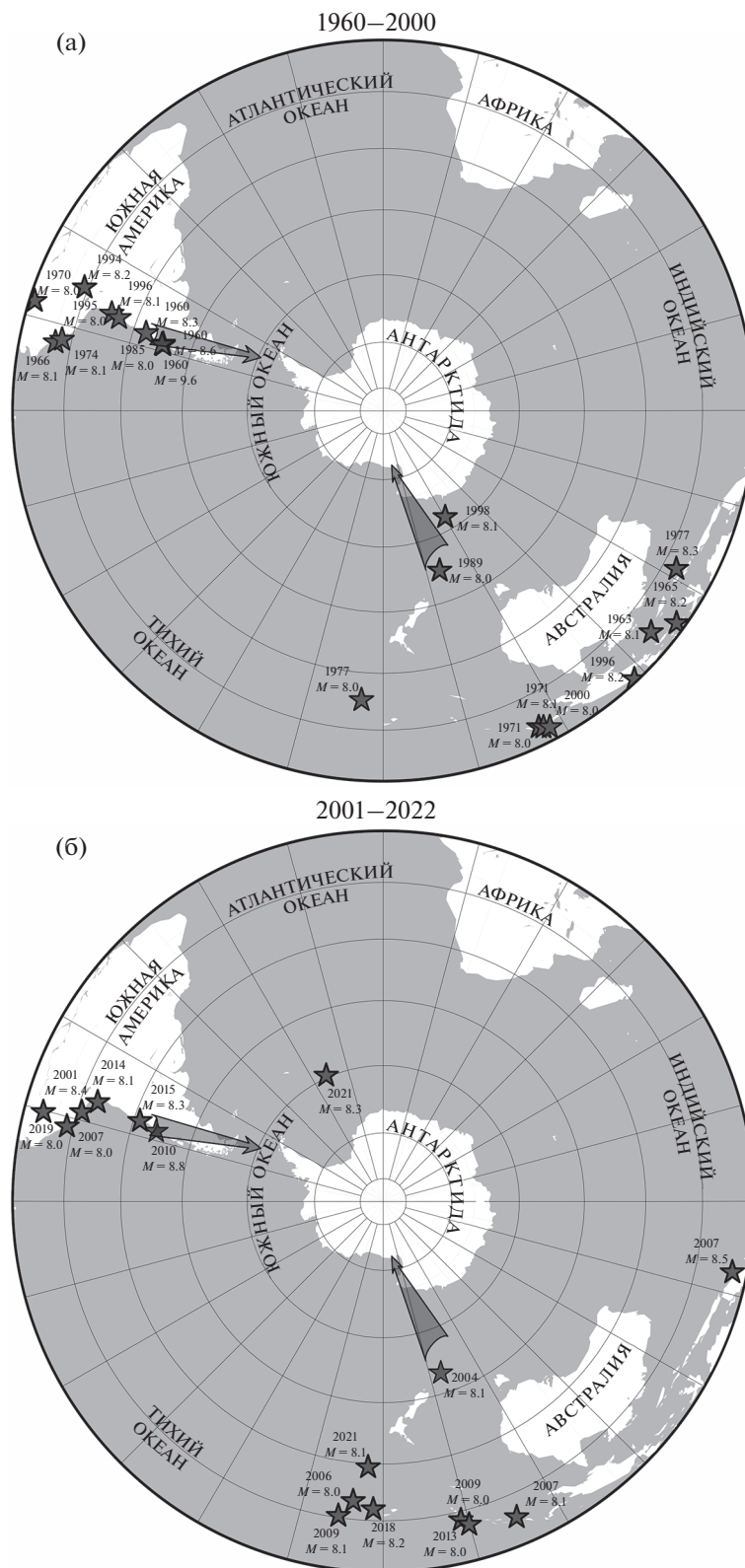
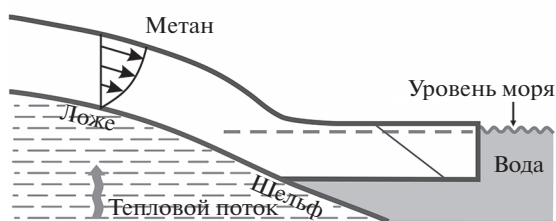
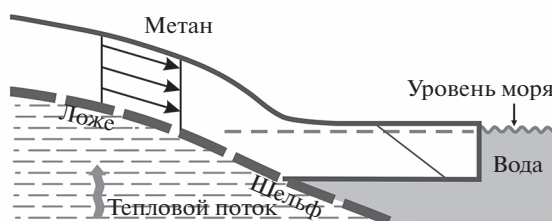


Рис. 4. Очаги сильнейших землетрясений в зонах субдукции Чилийской и Кермадек-Маккуори во второй половине XX в. и начале XXI в. Звезды соответствуют очаговым областям.

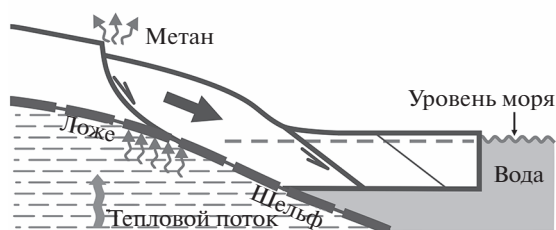
1. Медленная стадия вязкого течения ледника с прилипанием к ложу (~1000 лет)



2. Стадия скольжения ледника вдоль ложа из-за подплавления его подошвы с наличием зон сцепления (~100 лет)



3. Стадия быстрого скольжения ледника после разрушения зон сцепления деформационной волной с возникновением тылового разлома и эмиссией метана (~10 лет)



Условные обозначения

	Эпюра скоростей медленного течения		Эмиссия метана
	Эпюра скоростей при скольжении		Осадки, содержащие газогидраты
	Поверхность подплавления с зонами сильного сцепления		Листрический разлом покровного ледника (сброс)
	Поверхность подплавления с зонами слабого сцепления		Разлом между покровной и шельфовой частями ледника

Рис. 5. Схема различных стадий и режимов движения покровно-шельфовых ледников в западной Антарктиде.

Чилийской зоны субдукции (1995, 2001, 2007, 2010, 2014, 2015) (рис. 4а, 4б), а в 2021 году произошло сильнейшее землетрясение в Сандвичевом желобе (рис. 4б). Приход тектонических волн от этих очагов, согласно излагаемой концепции, приведет к дальнейшему разрушению ледников Ларсена, Уилкинса, Георга VI и других шельфовых ледников Антарктического полуострова в ближайшем будущем.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЫ И ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ПОДЛЕДНЫХ ГАЗОГИДРАТОВ

Льды Антарктиды состоят из покровных ледников (лежащих на коренном ложе пород земной коры), шельфовых ледников и морских льдов. Толщина меняющихся морских льдов составляет несколько метров, шельфовых ледников от десятков метров у берега до километра в тыловой части, тогда как мощность покровных ледников в некоторых районах Антарктиды превышает 4 км [Fretwell et al., 2013]. Шельфовый ледник представляет собой плавающий в океане массив льда,

прикрепленный к фронтальной части сползающего по коренному ложу в океан покровного ледника (рис. 5). Покровные ледники лежат на коренном ложе пород (осадочных или метаморфических) земной коры, причем часто рельеф ложа ледника лежит ниже уровня моря. Шельфовые ледники в стабильной ситуации могут препятствовать сползанию находящихся за ними покровных ледников в море. В свою очередь морские льды, окружающие шельфовые ледники, влияют на стабильность шельфовых ледников, предохраняя их от воздействия океанских волн и штормов [Christie et al., 2022].

На рис. 5 показана упрощенная схема различных режимов движения покровно-шельфового ледника, отражающая разные стадии его термомеханической эволюции. Первая начальная стадия эволюции соответствует медленному сползанию покровного ледника по коренному ложу пород в условиях полного сцепления подошвы ледника с поверхностью подстилающих осадочных пород. Течение ледника подобно стеканию очень вязкой (вязко-пластической) жидкости с наклонного ложа в условиях ее прилипания к не-

подвижному основанию. Скорость движения поверхности ледника зависит от целого ряда различных условий (режима питания ледника, геометрии коренного ложа, температуры среды, сцепления с породами основания и т.д.) и может варьировать в широких пределах, от первых метров до сотен метров в год. Например, в течение первой “холодной” стадии медленного течения ледника в условиях его полного сцепления с коренным ложем суммарное смещение ледника за тысячу лет может составить всего несколько км (рис. 5).

Вторая “теплая” стадия движения ледника в нашей схеме (рис. 5) принципиально отличается тем, что на подошве ледника появляются зоны плавления льда в результате длительного действия повышенного теплового потока, идущего снизу из находящихся под ледником слоев коры, как это имеет место на значительных площадях Западной Антарктиды [Зотиков, 1977]. При появлении водного слоя смазки на подошве ледника режим его движения существенно меняется, так как в зонах таяния льда ледяной массив начинает проскальзывать почти без трения по коренному ложу [Meuler et al., 2010; Епифанов, 2016]. Быстрое катастрофическое скольжение ледника как целого на этой стадии не возникает из-за того, что таяние на его подошве происходит пространственно неравномерно (в силу неровной геометрии основания, вариаций давления на подошву меняющегося по толщине ледника и других физико-механических причин) и между зонами плавления остаются “сухие” участки, в которых сохраняется сцепление ледника с коренным ложем. Вторая стадия эволюции ледника с частично подплавленной подошвой является подготовительной к третьей стадии и может продолжаться несколько десятков лет, пока не исчезнут сухие зоны зацепов в контактной зоне взаимодействия ледника с коренным ложем.

Третья катастрофическая стадия движения ледника характеризуется исчезновением зон сцепления на контактной поверхности взаимодействия ледника с подстилающим ложем и срывом ледника с коренного основания, сопровождаемым разрушением его тыловых участков с возникновением разломов и трещин (рис. 5). В нашей концепции третья стадия срыва и глыбового движения ледника возникает в результате прихода деформационных волн в Антарктиду от окружающих ее очагов сильнейших субдукционных землетрясений и разрушения оставшихся зон сцепления на контактной поверхности за счет добавочных напряжений, принесенных деформационной волной. В этом состоит сейсмогенно-триггерный механизм разрушения ледников, который реализуется при наступлении третьей катастрофической стадии движения ледника. При

быстром глыбовом скольжении ледника наряду с разрушением тыловой области покровного ледника, которое реализуется в условиях растяжения в виде вогнутых листрических разломов, также происходит разрушение в зоне стыка фронтальной части покровного ледника с плавающим шельфовым ледником (рис. 5). Это разрушение реализуется в условиях сжатия и частичного подвига фронтальной части покровного ледника под край шельфового ледника с образованием в зоне стыка наклонного разлома по аналогии с начальной стадией процесса субдукции литосферой плиты под островную дугу или край континента (рис. 5). Быстрое глыбовое движение ледника на третьей стадии эволюции прекращается в результате действия двух основных факторов: во-первых, быстро сползающий в океан покровный ледник испытывает блокирующее действие со стороны смежной части шельфового ледника, и, во-вторых, при быстром сползании ледника в тыловой зоне разломов уменьшается гидростатическое давление покровного ледника на подстилающее ложе, что повышает в этой зоне критическую фазовую температуру таяния льда, и вместо водяной смазки здесь возникает зона примерзания подошвы ледника к основанию, и, как следствие, появляется новая зона сцепления ледника, которая может остановить его движение.

Однако движение ледника может вновь возобновиться, если новая деформационная волна “срежет” возникшую в результате промерзания зону сцепления. Такие повторные быстрые движения ледников, как было показано выше, наблюдались при разрушении ледников Антарктического полуострова.

Разрушение зоны сочленения покровного и шельфового ледников с образованием наклонной разрывной поверхности подвига будет сопровождаться достаточно сильным ледотрясением (по аналогии с сильным землетрясением в зоне субдукции литосферы) и возникновением сейсмических упругих волн в теле шельфового ледника. Возникшие волны, проходя через трещиноватые ослабленные зоны шельфового ледника, находящиеся на достаточно большом удалении от места его сочленения с покровным ледником, будут приводить к повторным разрушениям этих удаленных ослабленных зон ледника. Таким образом можно объяснить разрушение периферических участков шельфовых ледников (например, ледника Ларсен-С) как последовательный эффект триггерного действия деформационных волн в литосфере и сейсмических волн в теле самого ледника.

Третья стадия движения и разрушения ледника в рассматриваемой концепции имеет прямое отношение к быстрому потеплению климата в

Антарктиде, о котором шла речь выше. Для прояснения этого вопроса обратимся к строению земной коры Антарктиды, которое характеризуется наличием обширных осадочных бассейнов, возникших в процессе ее геологической эволюции [Danesi, Morelli, 2001; Morelli, Danesi, 2004; Baranov, Morelli, 2013; Лейченко и др., 2015; Baranov et al., 2018; Straume et al., 2019; Baranov et al., 2021; Baranov, Morelli, 2023]. Сейсмические данные и данные бурения на шельфе показывают, что верхний слой осадочного разреза здесь представлен кайнозойскими молассами с многолетними мерзлыми породами. По современным представлениям [Domack et al., 2005; Wadham et al., 2012] осадочные породы, подстилающие лед Антарктиды, могут содержать большие запасы метана в виде газогидратов. Сделанные оценки этих запасов [Wadham et al., 2012] сопоставимы с оценками запасов метаногидратов, содержащихся в обширных областях вечной мерзлоты Арктического региона. Поэтому, так же как в Арктике, освобождение метана из газогидратов в осадочных породах при разрушении ледового покрова может привести к его эмиссии в атмосферу и потеплению климата. В этой связи представляет большой интерес недавнее обнаружение эмиссии метана на дне моря Росса в области существования газогидратов в осадочной толще [Thurber et al., 2020].

Возможный механизм разрушения ледников Антарктиды, приводящий к эмиссии метана, представлен на рис. 5. Как было отмечено выше, в тыловой зоне разломов и трещин быстро сползающего ледника падает гидростатическое давление на подстилающие слои осадков, по предположению, содержащих газогидраты. Это будет приводить к нарушению метастабильного состояния газогидратов и, как следствие, к высвобождению метана, запертого в микропорах низкопроницаемых мерзлых пород и частично диссоциированных метастабильных частицах газогидратов, окруженных тонкими прослойками льда. Выделенный из газогидратов свободный метан получит возможность быстрой фильтрации сквозь трещиноватую среду частично разрушенного ледника и выхода в атмосферу [Баренблатт и др., 2016; Лобковский, Рамазанов, 2019; 2022]. В этом и состоит предлагаемый нами физический механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Западной Антарктиде как следствие разрушения ледников тектоническими волнами, вызванными сильнейшими землетрясениями, происходящими в ближайших к Антарктиде зонах субдукции Чилийской и Кермадек-Маккуори, а также триггерного эффекта высвобождения метана из многолетнемерзлых осадочных пород и метастабильных газогидратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный сейсмогенно-триггерный механизм позволяет объяснить начавшееся в конце 20 века и продолжающееся в настоящее время потепление климата в Арктике и Антарктике, а также интенсивное разрушение покровно-шельфовых ледников Западной Антарктиды. Рассмотренный в данной работе механизм разрушения ледников и потепления климата в Антарктиде не отрицает существующие представления о влиянии на эти процессы теплых морских течений и атмосферных потоков. Предлагаемый подход расширяет эти представления, включая в общий анализ геодинамический фактор, нацеленный на объяснение причины начала резкой активизации разрушения ледников и потепления климата в Западной Антарктиде с конца прошлого века и усиления этих процессов в нынешнем столетии. Предложенный механизм позволяет также объяснить почему полярные регионы нагреваются существенно быстрее, чем основная часть нашей планеты, связывая этот факт с большими выбросами парникового метана в атмосферу в полярных областях. Необходимо отметить, что данная геодинамическая модель предсказывает дальнейшее ускорение разрушения ледников и потепление климата в Антарктиде в ближайшем будущем из-за беспрецедентного роста частоты сильнейших землетрясений в южной части Тихого океана в конце 20-го и начале 21-го веков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа частично выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004 и частично в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б.* Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене // Докл. РАН. Науки о Земле. 2003. Т. 391. № 6. С. 813–816.
- Баренблатт Г.И., Лобковский Л.И., Нигматулин Р.И.* Математическая модель истечения газа из газонасыщенного льда и газогидратов // Докл. РАН. Науки о Земле. 2016. Т. 470. № 4. С. 721–754.
- Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В.* Система разломов, контролирующая метановые сипл на шельфе моря Лаптевых // Докл. РАН. Науки о Земле. 2019. Т. 486. № 3. С. 354–358.
- Биргер Б.И.* Распространение напряжений в литосфере Земли // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 12. С. 3–18.
- Быков В.Г.* Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754.

- Гарагаиш И.А., Лобковский Л.И.* Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 42–50.
- Епифанов В.П.* Физическое моделирование режимов движения ледников // Снег и лед. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
- Зотиков И.А.* Тепловой режим ледникового покрова Антарктиды. Л.: Гидрометеоздат. 1977. 168 с.
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А.* Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 863–891.
- Кузьмин Ю.О.* Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–20.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182.
- Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Иванов С.В.* Строение земной коры и история геологического развития осадочных бассейнов индокеанской акватории Антарктики. СПб: ВНИИОкеангеология. 2015. 200 с.
- Лобковский Л.И.* Возможный сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39). С. 62–72.
- Лобковский Л.И., Рамазанов М.М.* К теории фильтрации с двойной пористостью // Докл. РАН. Науки о Земле. 2019. Т. 484. № 3. С. 348–351.
- Лобковский Л.И., Рамазанов М.М.* Термомеханические волны в системе упругая литосфера–вязкая астеносфера // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 6. С. 4–18.
- Лобковский Л.И., Рамазанов М.М.* Обобщенная модель фильтрации в трещиновато-пористой среде с низкопроницаемыми включениями и ее возможные приложения // Физика Земли. 2022. № 2. С. 144–154.
- Л. И. Лобковский, А. Баранов, И. С. Владимировна, В. Габсатаров.* Возможный сейсмогенно-триггерный механизм активизации разрушения ледников, эмиссии метана и потепления климата в Антарктиде // Океанология. — 2023. Т. 63, № 1. — С. 1–11.
- Матвеева Т.В.* Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках. Мировой океан. Т. 3. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты / Под ред. Л.И. Лобковского и Г.А. Черкашева. М.: Научный Мир, 2018. С. 586–694.
- Николаевский В.Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. Науки о Земле. 1995. Т. 341. № 3. С. 403–405.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра. 1996. 447 с.
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А.* Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмотектонический режим Байкальского лифта // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 383–406.
- Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение газогидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
- Суетнова Е.И.* Моделирование аккумуляции газогидратов при осадконакоплении и уплотнении осадков в субаквальных условиях // Физика Земли. 2007. № 9. С. 87–93.
- Якушев В.С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ. 2009. 192 с.
- Anderson D.L.* Accelerated plate tectonics // Science. 1975. V. 187 (4181). P. 1077–1079.
- Baranov, A., Morelli, A.* The Moho depth map of the Antarctica region // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 299–313.
- Baranov, A., Tenzer, R., Bagherbandi, M.* Combined Gravitmetric–Seismic Crustal Model for Antarctica. Surv. Geophys. 2018. V. 39. P. 23–56.
- Baranov A., Morelli A., Chuvaev A.* ANTASed – An Updated Sediment Model for Antarctica // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. 722699.
- Baranov A., Morelli A.* The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // Tectonophysics. 2023. V. 846. P. 299–313.
- Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. V. 11, 71.
- Bott M.H.P., Dean D.S.* Stress diffusion from plate boundaries // Nature. 1973. V. 243 (5406). P. 339–341.
- Bykov V.G.* Nonlinear waves and solitons in models of fault block geological media // Russian Geology and Geophysics. 2015. V. 56 (5). P. 793–803.
- Christie F.D.W., Benham T.J., Batchelor C.L. et al.* Antarctic ice-shelf advance driven by anomalous atmospheric and sea-ice circulation // Nature Geoscience. 2022. V. 15. P. 356–362.
- Chuvilin E.M., Tumskey V. E., Tipenko G.S., Gavrillov A.V., Bukhanov B.A., Tkacheva E.V., Audibert-Hayet A. Cauquil E.* Relic gas hydrate and possibility of their existence in permafrost within the South-Tambey gas field. Conference proceedings. SPE Arctic and Extreme environments. 2013. SPE 166925. P. 1945–1962.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D., Grebenkin S., Istomin V.* Dissociation and Self-Preservation of Gas Hydrates in Permafrost // Geosciences. 2018. V. 8(12). P. 431.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B.* Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic // Geosciences. 2020. V. 10. P. 383.
- Climate at a Glance: Global Time Series: [Электронный ресурс] // NOAA National Centers for Environmental information. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/cag/>. (Дата обращения: 15.09.2022).
- Cook A.J., Vaughan D.G.* Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years // Cryosphere. 2010. V. 4. P. 77–98.

- Danesi S., Morelli A.* Structure of the upper mantle under the Antarctic Plate from surface wave tomography // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. P. 4395–4398.
- Davidson D.W., Garg S.K., Gough S.R. et al.* Laboratory analysis of naturally occurring gas hydrate from sediment of the Gulf Mexico // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. V. 50. P. 619–623.
- Dickens G.R., O'Neil J.R., Rea D.K., Owen R.M.* Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene // *Paleoceanography*. 1995. V. 10. P. 965–971.
- Domack E., Ishman S., Leventer A. et al.* A chemotrophic ecosystem found beneath Antarctic Ice Shelf // *Eos Trans. AGU*. 2005. V. 86 (29). P. 269–272.
- Elsasser W.V.* Convection and stress propagation in the upper mantle. The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors / S.K. Runcorn (ed.). N.Y.: John Wiley. 1969. P. 223–246.
- Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G. et al.* Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 375–393.
- Kennett J., Cannariato K.G., Henry I.L., Behl P.J.* Methane hydrate in Quaternary climate change: the clathrate gun hypothesis. Washington, D.C: AGU. 2003. 217 p.
- Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E., Pushkarev V., Stanilovskaya Y.* Gas emission craters and mound-predecessors in the north of West Siberia, similarities and differences // *Remote Sens*. 2020. V. 12. 2182.
- Koven C.D., Ringeval B., Friedlingstein P., Ciais P., Cadule P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tarnocai C.* Permafrost carbon-climate feedback accelerated global warming // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V. 108(36). P. 14769–14774.
- Kvenvolden K.A.* Methane hydrates and global climate // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1988. V. 2. P. 221–229.
- Lay T., Kanamori H.* An asperity model of large earthquake sequences. *Earthquake prediction: An international review* / Simpson, D.W., Richards P.G. (eds.) AGU Washington DC. 1981. P. 579–592.
- Lay T.* The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 409. P. 133–146.
- Leibman M.O., Kizyakov A., Plekhanov A.V., Streletskaya I.* New permafrost feature – deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations // *Geogr. Environ. Sustain*. 2014. V. 7. P. 68–79.
- Lobkovsky L.* Seismogenic-Trigging Mechanism of Gas Emission Activizations on the Arctic Shelf and Associated Phases of Abrupt Warming // *Geosciences*. 2020. V. 10 (11). P. 428.
- Lobkovsky, L.I., Baranov, A.A., Ramazanov, M.M., Vladimirova, I.S., Gabsatarov, Y.V., Semiletov, I.P., Alekseev, D.A.* Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation. *Geosciences*. 2022. V. 12(10). P. 372.
- Lösing M., Ebbing J., Szwillus W.* Geothermal heat flux in Antarctica: assessing models and observations by Bayesian inversion // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8. P. 105.
- Marshall G.J., Orr A., van Lipzig N.P.M. et al.* The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 5388–5404.
- Maslin M., Owen M., Day S., Long D.* Linking continental-slope failure and climate change: testing the clathrate gun hypothesis // *Geology*. 2004. V. 32. P. 53–56.
- Melosh H.J.* Nonlinear stress propagation in the Earth's upper mantle // *J. Geophysical Research*. 1976. V. 81. P. 5621–5632.
- Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K. et al.* Relationships between water wettability and ice adhesion // *Applied Materials Interfaces*, American Chemical Society. 2010. V. 2(11). P. 3100–3110.
- Morelli A., Danesi S.* Seismological imaging of the Antarctic continental lithosphere: a review // *Global and Planetary Change*. 2004. V. 42. P. 155–165.
- Rice J.R.* The mechanics of earthquake rupture. *Physics of the Earth's Interior* / Ed. by Dziewonski A.M., Boschi E. North-Holland, Amsterdam: Italian Physical Society. 1980. P. 555–649.
- Ruppel C.D., Kessler J.D.* The interaction of climate change and methane hydrates // *Rev. Geophys*. 2017. V. 55. P. 126–168.
- Scambos T.A., Bohlander J.A., Shuman C.A. et al.* Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. P. L18402.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost related methane flux and role of sea ice // *Nature Comm*. 2017. V. 8. P. 15872.
- Smith J., Hillenbrand C.-D., Subt C. et al.* History of the Larsen C Ice Shelf reconstructed from sub-ice shelf and offshore sediments // *Geology*. 2021. V. 49 (8). P. 978–982.
- Straume E.O., Gaina C., Medvedev S. et al.* GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's oceans // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. V. 20. P. 1756–1772.
- Thurber A.R., Seabrook S., Welsh R.M.* Riddles in the cold: Antarctic endemism and microbial succession impact methane cycling in the Southern Ocean // *Proceeding of the Royal Society B, Biological Sciences*. 2020. V. 287. P. 20201134.
- Wadham J.L., Arndt S., Tulaczyk S. et al.* Potential methane reservoirs beneath Antarctica // *Nature*. 2012. V. 488. P. 633–637.
- Wallmann K., Pinero E., Burwicz E., Haeckel M., Hensen C., Dale A., Ruepkeet L.* The global inventory of methane hydrate in marine sediments: a theoretical approach // *Energies*. 2012. V. 5. P. 2449–2498.
- Wallmann K., Riedel M., Hong W.L., Patton H., Hubbard A., Pape T., Hsu C.W., Schmidt C., Johnson J.E., Torres M.E., Andreassen K., Berndt C., Bohrmann G.* Gas hydrate disso-

ciation off Svalbard induced by isostatic rebound rather than global warming // *Nature Comm.* 2018. V. 9. P. 83.

Wang S., Liu H., Jezek K. et al. Controls on Larsen C Ice Shelf retreat from a 60-year satellite data record // *J. Geophysical Research: Earth Surface*. 2022. V. 127. P. e2021JF006346.

Wille J.D., Favier V., Jourdain N.C. et al. Intense atmospheric rivers can weaken ice shelf stability at the Antarctic

Peninsula // *Communications Earth & Environment*. 2022. V. 3. P. 90.

World Climate Declaration: [Электронный ресурс] // *Climate Intelligence (CLINTEL)*. URL: <https://clintel.org/wp-content/uploads/2022/09/WCD-version-091522.pdf> (дата обращения: 15.09.2022).

Yakushev V.S., Istomin V.A. Gas hydrate self-preservation effect. *Physics and Chemistry of Ice* / N. Maeno, T. Hondoh (eds.). Sapporo: Hokkaido Univ. Press. 1992. P. 136–140.

Possible Seismogenic-Trigger Mechanism of Methane Emission, Glacier Destruction and Climate Warming in the Arctic and Antarctic

L. I. Lobkovsky^{a, b, *}, A. A. Baranov^c, M. M. Ramazanov^d, I. S. Vladimirova^{a, b},
Y. V. Gabsatarov^{a, b, **}, and D. A. Alekseev^{a, b}

^a*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141701 Russia*

^c*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^d*Institute for Geothermal Research and Renewable Energy, Branch of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367030 Russia*

*e-mail: llobkovsky@ocean.ru

**e-mail: yuryg@gsras.ru

Abstract—A seismogenic-trigger mechanism is proposed for the activation of methane emission on the Arctic shelf in the late 1970s, which caused the onset of a rapid climate warming in the Arctic, as well as the intensive destruction of the ice shelves of West Antarctica in the late 20th and early 21st centuries. This process is accompanied by the release of methane from the underlying hydrate-bearing sedimentary rocks and the rapid climate warming in Antarctica. The proposed mechanism is associated with the action of deformation tectonic waves in the lithosphere-asthenosphere system, caused by strong earthquakes occurring in the subduction zones closest to the polar regions: the Aleutian, located in the northern part of the Pacific Ocean, and the Chilean and Kermadec-Macquarie, located in the southeastern and southwestern parts of the Pacific lithosphere. Disturbances of the lithosphere are transmitted at an average speed of about 100 km/year over long distances of the order of 2000–4000 km, and the associated additional stresses that come to the Arctic and Antarctica several decades after earthquakes lead to the destruction of metastable gas hydrates located in the frozen rocks of the Arctic shelf or in the subglacial sedimentary rocks of Antarctica, causing the greenhouse effect of warming. Moreover, transmission of additional stresses causes a decrease in the adhesion of sheet glaciers to the underlying rocks, their accelerated sliding and the destruction of the ice sheet ice shelves in Antarctica. The considered hypothesis leads to the conclusion that in the coming decades, the processes of glacier destruction and climate warming in Antarctica will increase due to an unprecedented increase in the number of strongest earthquakes in the subduction zones of the South Pacific Ocean in the late 20th and early 21st centuries.

Keywords: West Antarctica, glacier destruction, methane emission, climate warming, strong earthquakes, subduction zones of the southern part of the Pacific lithosphere, tectonic waves, trigger mechanism, metastable gas hydrates