

УДК 551.242

ВОЗМОЖНЫЙ СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ АКТИВИЗАЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ, ЭМИССИИ МЕТАНА И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АНТАРКТИДЕ

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

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

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

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

*e-mail: llobkovsky@ocean.ru

**e-mail: yuryg@gsras.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 16.08.2022 г.

Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации в конце XX и начале XXI веков разрушения покровно-шельфовых ледников Западной Антарктиды, сопровождаемого выделением метана из подстилающих гидратсодержащих осадочных пород и быстрым потеплением климата. Данный механизм связан с действием деформационных волн в системе литосфера–астеносфера, возникающих в результате сильнейших землетрясений, происходящих в окружающих Антарктиду зонах субдукции – Чилийской и Кермадек-Маккуори. Возмущения литосферы передаются на большие расстояния порядка 3000 км и связанные с ними добавочные напряжения, приходящие в Антарктиду через несколько десятков лет после землетрясений, приводят к уменьшению сцепления ледников с подстилающими породами, ускоренному скольжению ледников и развитию в них разломов, которые уменьшают давление на подстилающие осадочные слои, содержащие газогидраты, что приводит к эмиссии метана и потеплению климата. 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 XX и начале XXI веков.

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

DOI: 10.31857/S0030157423010069, **EDN:** ANGFEO

ВВЕДЕНИЕ

Проблема потепления климата относится к одной из самых острых проблем современности и, хотя сегодня доминирует точка зрения об антропогенной причине этого явления, связанного с промышленными выбросами углекислого газа в атмосферу, остается ряд вопросов, не нашедших удовлетворительного объяснения в рамках данной парадигмы. Одним из таких вопросов является наблюдаемый резкий рост температуры на Земле, особенно в Арктике, приуроченный к концу 70-х годов прошлого века, который продолжается и в наши дни. При этом сколько-нибудь заметного роста мирового промышленного производства в эти годы отмечено не было. В такой ситуации становится актуальным анализ альтер-

нативных (по отношению к антропогенной точке зрения) подходов для объяснения внезапного начала быстрого потепления климата в указанный период времени. Если обратиться к возможным природным факторам потепления климата, то очевидно, что они должны быть связаны с крупномасштабными процессами катастрофического характера, способными обеспечить резкий сдвиг климатической системы, приводящий к быстрому потеплению. Среди известных крупномасштабных катастрофических событий на Земле, происходящих достаточно часто, обращают на себя внимание сильнейшие землетрясения с магнитудой больше 8, приуроченные к зонам субдукции литосферных плит. Но как их связать с потеплением климата? Л.И. Лобковский впервые в

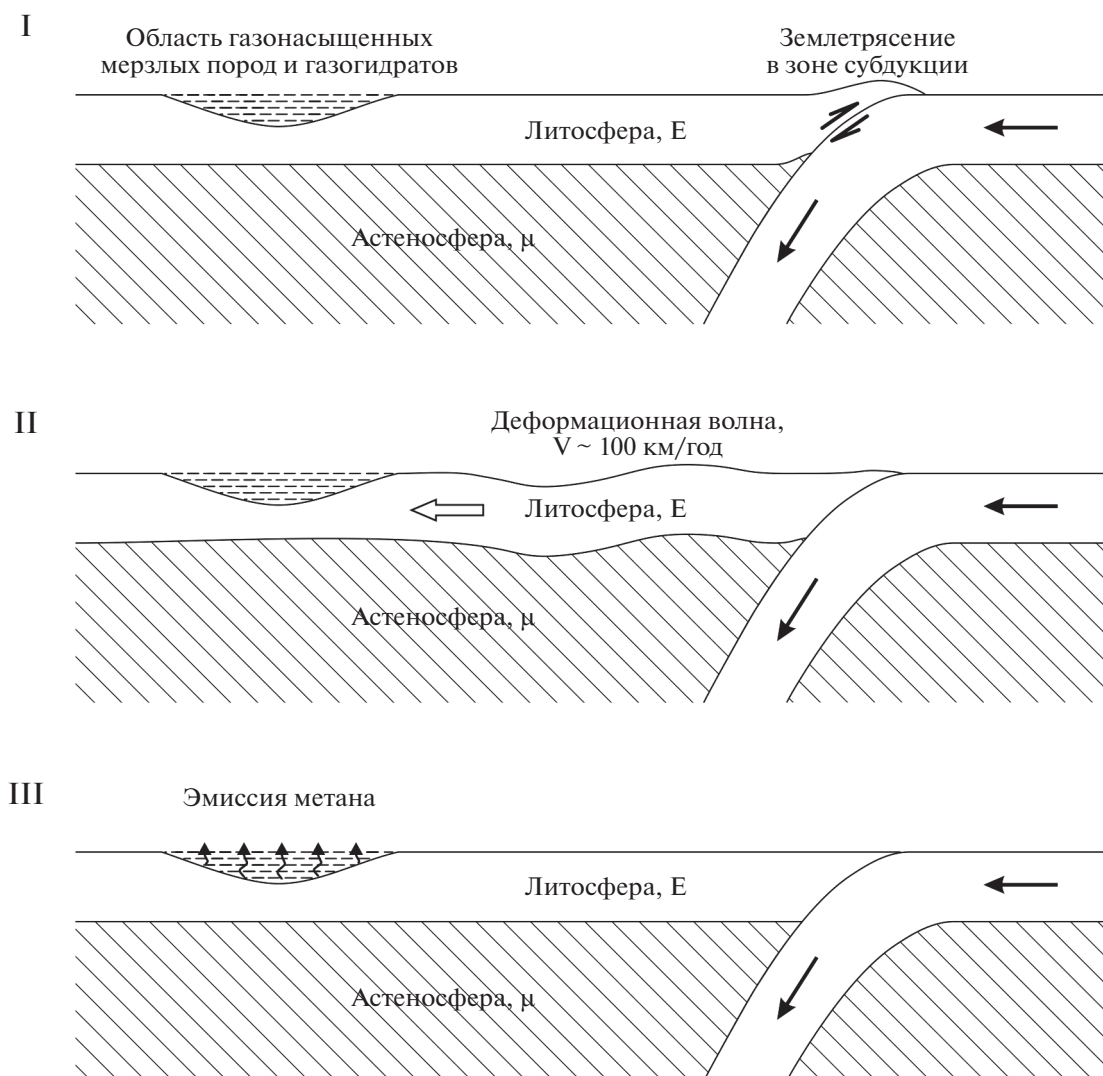


Рис. 1. Схема сейсмогенно-триггерного механизма эмиссии метана на Арктическом шельфе вследствие разрушающего действия на газогидраты деформационных волн, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции.

2020 г. предложил гипотезу о том, что потепление в Арктике может быть обусловлено приходом деформационных тектонических волн, возбужденных сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции, в область арктического шельфа и разрушением добавочными напряжениями внутренней микроструктуры расположенных в мерзлых породах шельфа метастабильных газогидратов, что приводит к освобождению запертого в них метана и его эмиссии в атмосферу, вызывая потепление климата вследствие известного парникового эффекта [7, 22] (рис. 1).

Для подтверждения этой гипотезы необходимо было прежде всего убедиться в наличии пространственно-временной корреляции между сильнейшими землетрясениями и наблюдаемыми климатическими изменениями. На рис. 2 показаны в сопоставлении график изменения средней темпе-

ратуры в Арктике на протяжении XX и начала XXI веков и ход выделения сейсмической энергии Земли, определяемой, главным образом, сильнейшими землетрясениями с магнитудой больше 8.

Из этого сопоставления 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 землетрясения: 1957 г. ($M = 8.6$), 1964 г. ($M = 9.2$) и 1965 г. ($M = 8.7$). Получается, что 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 было объяснено скоростью распространения деформационных волн в системе “упругая литосфера–

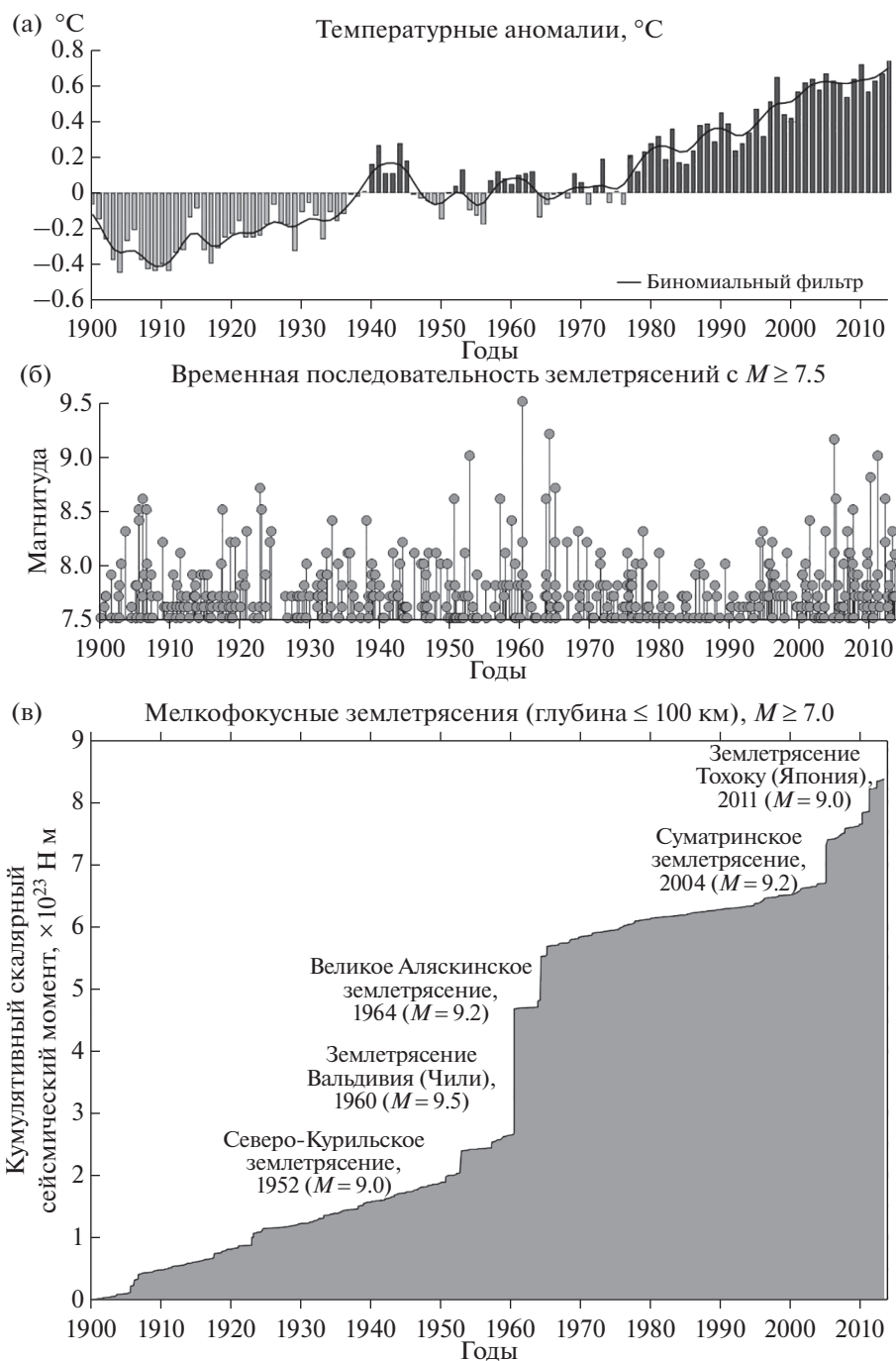


Рис. 2. Сопоставление графиков изменения средней температуры в Арктике на протяжении XX и начала XXI веков и выделения сейсмической энергии Земли (по [14, 21], модифицировано).

вязкая астеносфера” порядка 100 км/год [2, 3, 9, 18, 25], поскольку за это время волны проходят расстояние около 2000 км между арктическим шельфом и Алеутской дугой.

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, которые 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.

Ниже рассматривается сейсмогенно-триггерный механизм, связывающий разрушение покровно-шельфовых ледников и потепление Антарктического полуострова с сильнейшими землетрясениями, который ранее был предложен для Арктики [7, 22, 23].

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 [13–15, 24]. В Западной Антарктиде температура начала быстро расти с конца 70-х годов прошлого века, потепление там продолжается и в наши дни, сопровождаясь заметным сокращением плавающих льдов. Большинство исследований 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 [13]. В результате разрушились ледники Ларсен-А (1995 г.) и Ларсен-Б (2002 г.), а от ледника Ларсен-С в 2017 г. откололся гигантский айсберг А68 площадью около 5800 км², уменьшив площадь ледника на 12% [29, 33]. Разрушались и другие ледники Западной Антарктиды. Например, в 2000 г. от шельфового ледника Росса откололся крупнейший за всю историю наблюдений айсберг В-15. 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 [34]. В этой связи, как и в случае с Арктикой, возникает основной вопрос: почему эти процессы возникли 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. Предлагаемая 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.

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ И ФАЗАМИ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЫ

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 синим 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, генерирующей сильнейшие землетрясения, является Чилийская зона, где в 1960 г. произошло самое мощное за всю историю инструментальных наблюдений мега-землетрясение с предельной магнитудой $M = 9.5$ (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. 3). 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

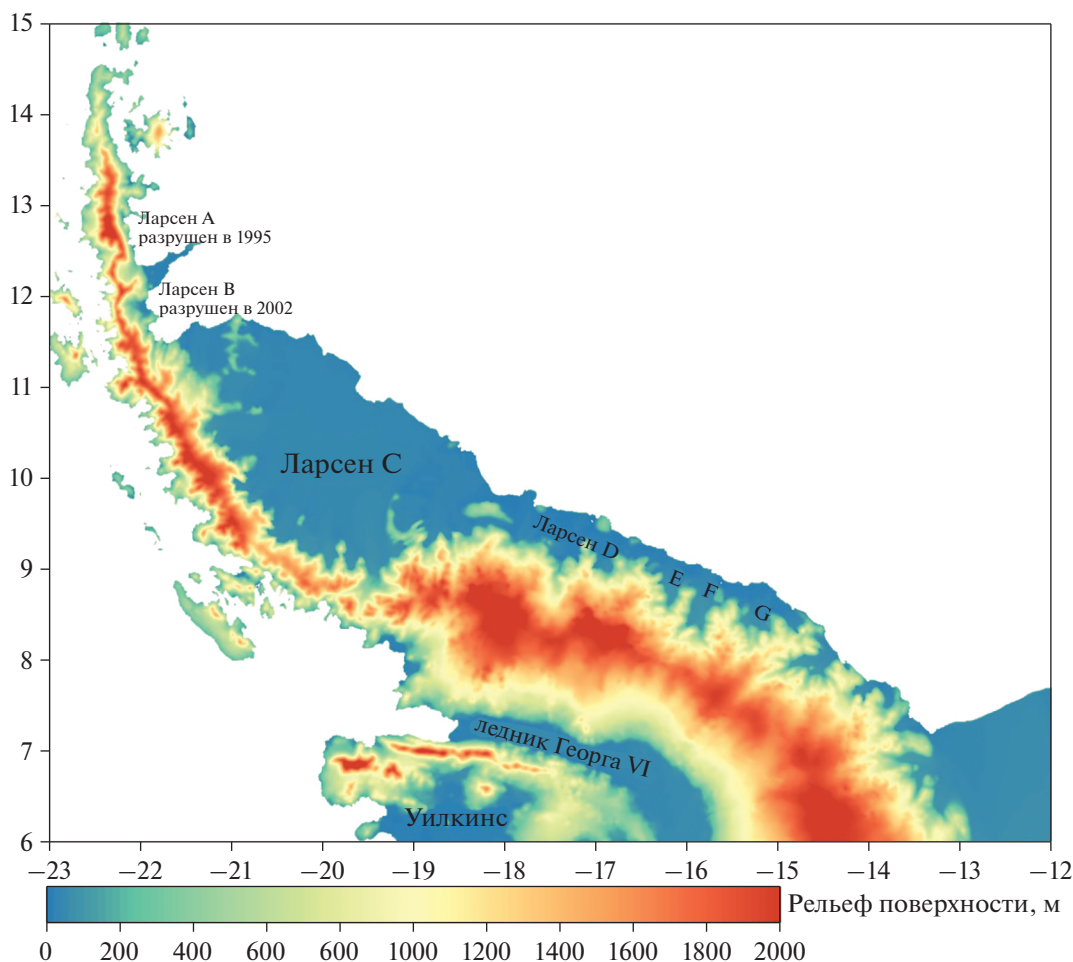


Рис. 3. Карта надводной поверхности Антарктического полуострова.

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 [7], 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. Возможно, что образование разломов в леднике Георга VI в 2001 г. также связано с цугом тектонических волн, пришедших от сильнейших землетрясений 1960 г.

Следующий акт разрушения ледника Ларсена состоялся в 2002 г. в сегменте В, примыкающем с юга к блоку А (рис. 3) [28]. 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). Возможно, что это же землетрясение привело к повторному крупному разрушению ледника Уилкинса в 2008–2009 гг. юго-западнее ледника Ларсен-В благодаря цугу тектонических волн. В частности, рухнул ледяной мост, соединяющий часть шельфового ледника с островом Шарко.

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. В 2017 г. от этого ледника откололся огромный айсберг [33]. Эти события можно связать с сильнейшим землетрясением с магнитудой $M = 8.0$, произошедшим в Чилийской зоне субдукции в 1985 г. (рис. 4а) (снова получается сдвиг по вре-

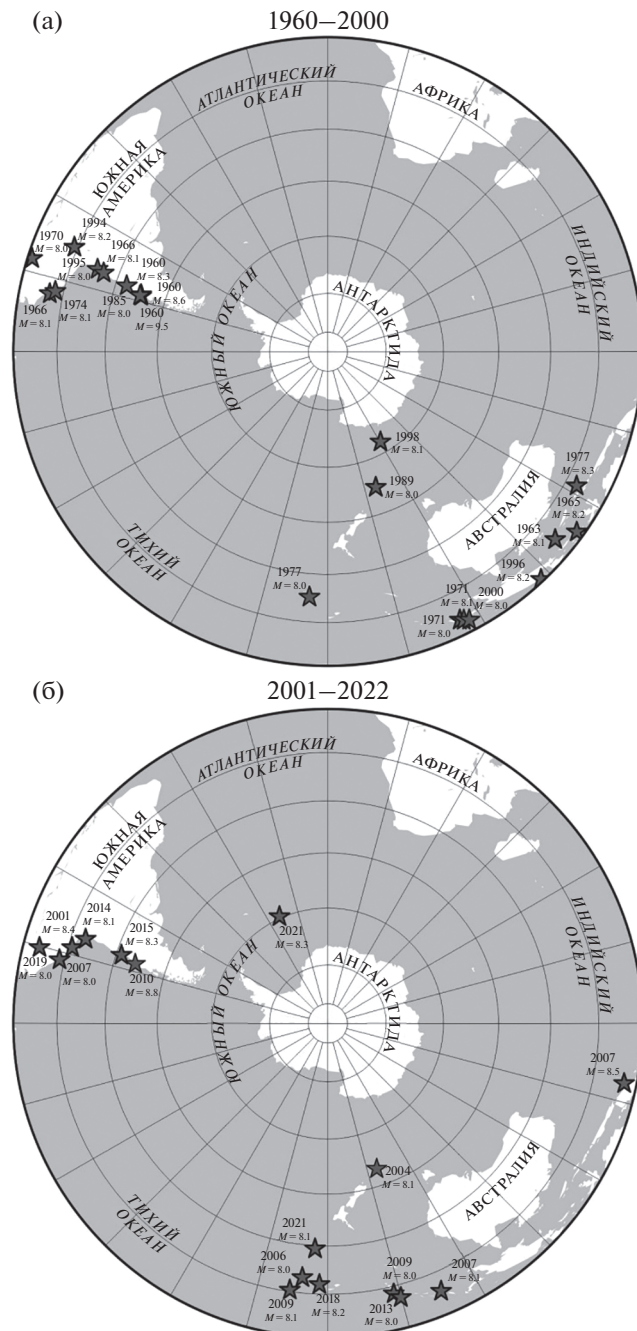


Рис. 4. Очаги сильнейших землетрясений в зонах субдукции Чилийской и Кермадек-Маккуори во второй половине XX в. и начале XXI в. Темно-серые звезды соответствуют очаговым областям.

мени 30–35 лет). Несколько раньше, в 2013 г., произошла еще одна фаза разрушения уже значительно разбитого предыдущей серией тектонических волн ледника Уилкинса. Заметим, что после 2013 г. разрушений ледника Уилкинса больше не наблюдалось.

Интересно сопоставить и проанализировать с позиций сейсмогенно-триггерной гипотезы некоторые аномальные геофизические и климатиче-

ские явления, наблюдавшиеся в области Антарктического полуострова совсем недавно, в 2020 и 2021 гг. В первую очередь, отметим неожиданно возникшую во второй половине 2020 г. сейсмическую активность в виде крупного роя землетрясений небольшой магнитуды в количестве более 80 тысяч толчков, произошедших вблизи оконечности Антарктического полуострова [12]. Это явление было предложено объяснить “пробуждением” давно “спящего” подводного вулкана, расположенного под морским дном в проливе Брансфилда между Южными Шетландскими островами и северо-западной оконечностью Антарктиды. К этому району приурочена зона субдукции плиты Феникса, погружающейся под окраину Антарктиды, которая является продолжением на юг крупномасштабной Чилийской зоны субдукции Тихоокеанской плиты.

Предлагаемая нами альтернативная точка зрения состоит в том, что возникновение роя землетрясений малой магнитуды обусловлено добавочными напряжениями в литосфере, “принесенными” тектонической волной в данный район в 2020 г., вызванной сильнейшим землетрясением с магнитудой 8.0, произошедшим в Чилийской зоне субдукции в 1985 г. (рис. 4а) (временной сдвиг 35 лет). Но даже если принять гипотезу пробуждения вулкана, то конкретное время этого пробуждения логично связать с приходом в данное место тектонической волны, которая явилась механическим триггером начала движения магмы по раскрывающимся трещинам, что и могло вызвать наблюдаемый рой землетрясений. В 2022 г. та же тектоническая волна привела к разрушению оставшейся части шельфового ледника Ларсена-В на северо-восточной окраине Антарктического полуострова.

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 откололся 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 [9] обусловлено отличием реологических параметров литосферы и астеносферы в разных регионах, определяющих ско-

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

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКОВ ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЫ, ИХ РАЗРУШЕНИЕ 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 [19]. 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 [13].

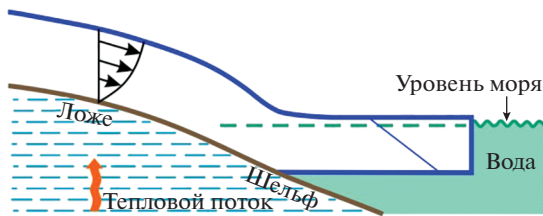
На рис. 5 показана упрощенная схема различных режимов движения покровно-шельфового ледника, отражающая разные стадии его термомеханической эволюции. Первая начальная стадия эволюции соответствует медленному сползанию покровного ледника по коренному ложу пород в условиях полного сцепления подошвы ледника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

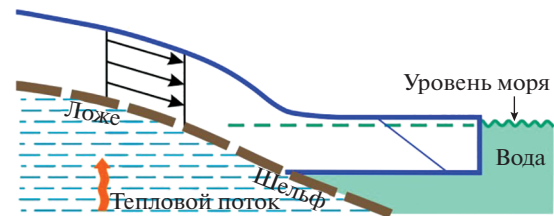
Вторая “теплая” стадия движения ледника в нашей схеме (рис. 5) принципиально отличается тем, что на подошве ледника появляются зоны плавления льда в результате длительного действия повышенного теплового потока, идущего снизу из находящихся под ледником слоев коры, как это имеет место на значительных площадях Западной Антарктиды [5] (рис. 6). 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 [4, 26]. 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. Заметим, что представление о существовании локальных участков сцепления на контактной поверхности смещения смежных блоков коры широко используется при анализе развития очагов сильнейших землетрясений в контактной области взаимодействия литосферных плит в зонах субдукции, получив название “асперити” (asperity) – шероховатость контактной поверхности [20].

Третья катастрофическая стадия движения ледника характеризуется исчезновением зон сцепления (шероховатостей) 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 тектонических деформационных волн в Антарктиду от окружающих ее очагов сильнейших субдукционных землетрясений и разрушения оставшихся зон сцепления (шероховатостей) на контактной поверхности за счет добавочных напряжений, принесенных деформационной волной. В этом состоит сейсмогенно-триггерный механизм разрушения ледников, который реализуется при наступлении тре-

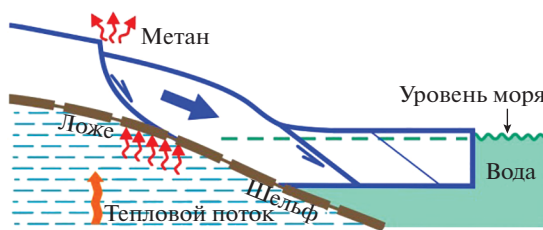
1. Медленная стадия вязкого течения ледника с прилипанием к ложу (~1000 лет)



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

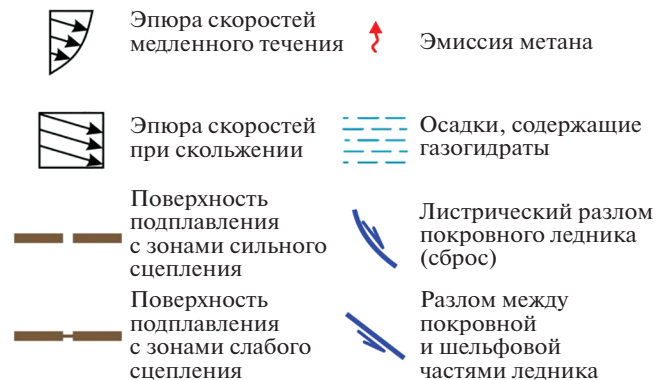


Рис. 5. Схема различных стадий и режимов движения покровно-шельфовых ледников в западной Антарктиде.

тьей 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 литосферной 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 про-

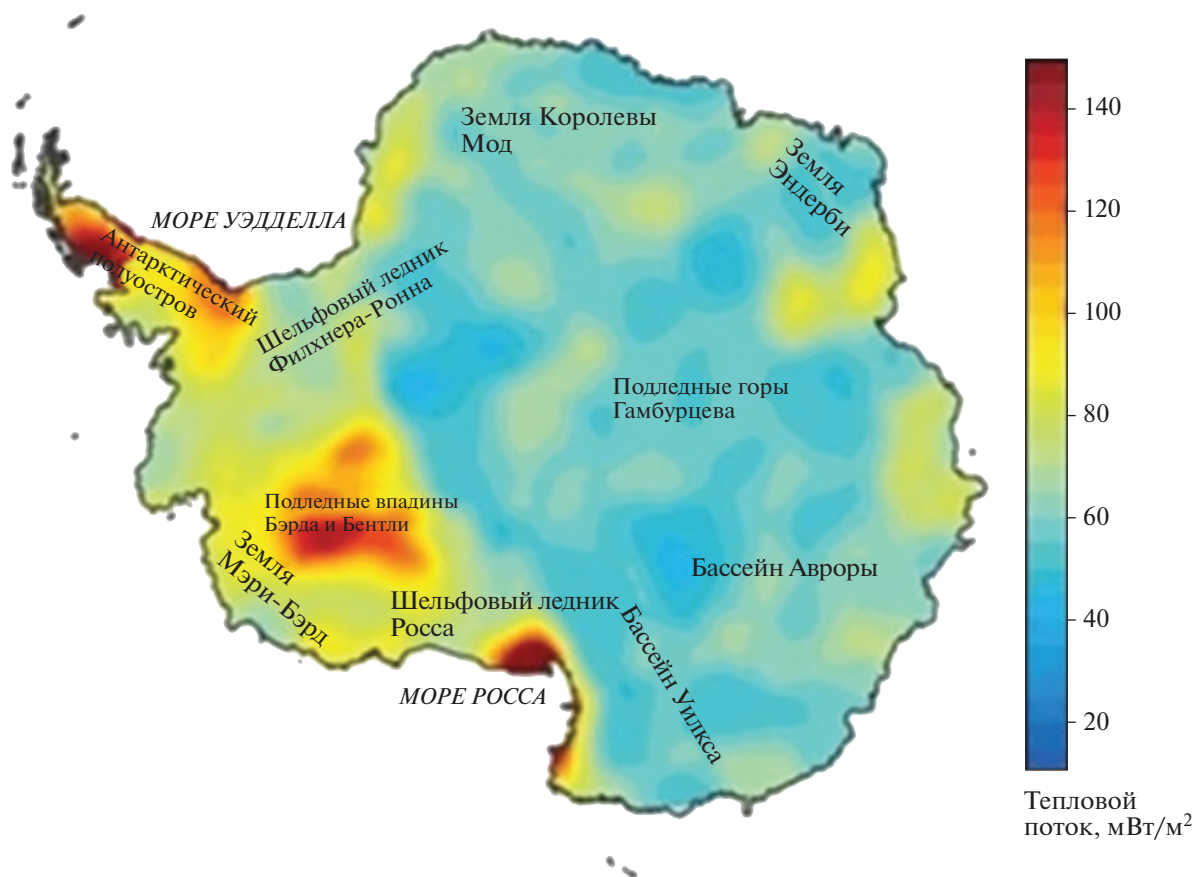


Рис. 6. Карта теплового потока Антарктиды (по [23], модифицировано).

яснения этого вопроса обратимся к строению земной коры Антарктиды, которое характеризуется наличием обширных осадочных бассейнов, возникших в процессе ее геологической эволюции [6, 11, 12]. Например, земная кора Западной Антарктиды в ходе эволюции подвергалась рифтогенному растяжению, что привело к образованию осадочных бассейнов, подстилающих, в частности, окружающие Антарктиду моря [6, 11, 13, 14, 16, 27, 30]. Сейсмические данные и данные бурения на шельфе показывают, что верхний слой осадочного разреза здесь представлен кайнозойскими молассами с многолетними мерзлыми породами. Над этими породами расположено мелководное море и шельфовые ледники. По современным представлениям [17, 32], осадочные породы, подстилающие лед Антарктиды, могут содержать большие запасы метана в виде газогидратов. Сделанные оценки этих запасов [32] сопоставимы с оценками запасов метаногазидратов, содержащихся в обширных областях вечной мерзлоты Арктического региона. Поэтому, также 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 [31].

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 частиц газогидратов, окруженных тонкими прослойками льда. Выделенный из газогидратов свободный метан получит возможность быстрой фильтрации сквозь трещиноватую среду частично разрушенного ледника и выхода в атмосферу [1, 8, 10]. 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 ускорения движения ледников и освобождения метана из метастабильных газогидратов вследствие прихода тектонических волн от очагов сильнейших субдукционных землетрясений в южной части Тихого океана позволяет объяснить начавшееся в конце XX века и продолжающееся в настоящее время потепление климата и разрушение 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 XX и начале XXI веков.

Источник финансирования. 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

1. 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.
2. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754.
3. Гарагаш 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.
4. Епифанов В.П. Физическое моделирование режимов движения ледников // Снег и лед. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
5. Зотиков И.А. Тепловой режим ледникового покрова Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 168 с.
6. Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Иванов С.В. Строение земной коры и история геологического развития осадочных бассейнов индоокеанской акватории Антарктики. СПб: ВНИИОкеангеология, 2015. 200 с.
7. 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.
8. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. К теории фильтрации с двойной пористостью // Докл. РАН. Науки о Земле. 2019. Т. 484. № 3. С. 348–351.
9. 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.
10. 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.
11. Baranov A., Morelli A., Chuvaev A. ANTASed – An Updated Sediment Model for Antarctica // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. Article 722699.
12. 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.
13. Baranov A., Morelli A. The Moho depth map of the Antarctica region // *Tectonophysics*. 2013. V. 609. P. 299–313.
14. Baranov A., Tenzer R., Bagherbandi M. Combined Gravimetric-Seismic Crustal Model for Antarctica. *Surv. Geophys.* 2018. V. 39. P. 23–56.
15. Cesca S., Sukan M., Rudzinski L. et al. Massive earthquakes swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica // *Communications Earth & Environment*. 2022. V. 3. Article 89.
16. 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.
17. Climate at a Glance: Global Time Series: [Электронный ресурс] // NOAA National Centers for Environmental information. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/cag/>. (Дата обращения: 08.07.2022).
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.

22. *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.
23. *Lay T., Kanamori H.* An asperity model of large earthquake sequences, in *Earthquake prediction: An international review* / *Simpson D.W., Richards P.G.* (Eds.). AGU: Washington, D.C. 1981. P. 579–592.
24. *Lay T.* The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 409. P. 133–146.
25. *Lobkovsky L.* Seismogenic-Triggering Mechanism of Gas Emission Activizations on the Arctic Shelf and Associated Phases of Abrupt Warming // *Geosciences*. 2020. V. 10 (11). Article 428.
26. *Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatov 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.
27. *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. Article 105.
28. *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 // *Journal of Climate*. 2006. V. 19. P. 5388–5404.
29. *Melosh H.J.* Nonlinear stress propagation in the Earth's upper mantle // *Journal of Geophysical Research*. 1976. V. 32 (81). P. 5621–5632.
30. *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.
31. *Morelli A., Danesi S.* Seismological imaging of the Antarctic continental lithosphere: a review // *Global and Planetary Change*. 2004. V. 42. P. 155–165.
32. *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. Article L18402.
33. *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.
34. *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.
35. *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. Article 20201134.
36. *Wadham J.L., Arndt S., Tulaczyk S. et al.* Potential methane reservoirs beneath Antarctica // *Nature*. 2012. V. 488. P. 633–637.
37. *Wang S., Liu H., Jezek K. et al.* Controls on Larsen C Ice Shelf retreat from a 60-year satellite data record // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2022. V. 127. Article e2021JF006346.
38. *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. Article 90.

Possible Seismogenic-Trigger Mechanism of Activation of Glacier Destruction, Methane Emission and Climate Warming in Antarctica

L. I. Lobkovsky^{a, b, #}, A. A. Baranov^c,
I. S. Vladimirova^{a, b}, Y. V. Gabsatov^{a, b, ##}

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

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

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

[#]*e-mail: llobkovsky@ocean.ru*

^{##}*e-mail: yuryg@gsras.ru*

A seismogenic-trigger mechanism is proposed for the rapid activation of the destruction of cover and shelf glaciers in West Antarctica at the end of the 20th and the beginning of the 21st centuries, accompanied by the release of methane from the underlying hydrate-bearing sedimentary rocks and consequent rapid climate warming. This mechanism is associated with the action of deformation waves in the lithosphere-asthenosphere system, resulting from the strongest earthquakes occurring in the subduction zones surrounding Antarctica – Chile and Kermadec-Macquarie. Disturbances in the lithosphere are transmitted over long distances of the order of 3000 km, and the additional stresses associated with them, which come to Antarctica several decades after earthquakes, lead to a decrease in the adhesion of glaciers to underlying rocks, accelerated sliding of glaciers and the development of faults in them. This process, in turn, results in a reduction of pressure on the underlying sedimentary layers containing gas hydrates, which lead to methane emission and climate warming. The considered hypothesis leads to the conclusion that in the coming decades the processes of destruction of glaciers and climate warming in Antarctica will speed-up 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, activation of glacier collapse, methane emission, abrupt global warming, strong earthquakes, subduction zones of the southern part of the Pacific Ocean, tectonic waves, trigger mechanism, metastable gas hydrates, permafrost