СИЛЬНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ТРИГГЕРЫ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ В АНТАРКТИКЕ

© 2023 г. Л. И. Лобковский^{а,b,*}, А. А. Баранов^{с,**}, И. С. Владимирова^{а,d,***}, Д. А. Алексеев^{b,a,****}

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

^b Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия ^c Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия ^d Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба РАН", Обнинск, Россия

> *E-mail: llobkovsky@ocean.ru **E-mail:aabaranov@gmail.com ***E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru ****E-mail: alexeevgeo@gmail.com

Поступила в редакцию 28.04.2023 г. После доработки 20.05.2023 г. Принята к публикации 30.05.2023 г.

Согласно современной климатической парадигме, аномальные явления, происходящие в полярных регионах Земли, такие как быстрое потепление в Арктике и интенсивное разрушение ледников в Антарктике, представляют серьёзную опасность и являются вызовом для цивилизации, поскольку потенциально могут привести к глобальному потеплению климата на несколько градусов и подъёму уровня Мирового океана на несколько десятков сантиметров уже в XXI веке. Считается, что основной причиной этих процессов, получивших сильное ускорение со второй половины 1970-х годов, стал антропогенный фактор выбросов углекислого газа в атмосферу, приводящий к парниковому эффекту. Утверждение, взятое за аксиому в большинстве развитых стран, привело к ряду международных соглашений по ограничению выбросов углекислого газа и представлениям о необходимости быстрого перехода к низкоуглеродной "зелёной" экономике.

Что касается влияния природных факторов на развитие упомянутых опасных процессов, то никто не отрицает такой возможности, поскольку в геологической истории Земли хорошо известны факты климатических изменений в доиндустриальные эпохи. Однако геологические масштабы времени настолько велики, что большинство климатологов подспудно исходят из того, что наблюдаемые в течение прошлого и нынешнего столетий короткопериодные изменения климата с характерным временем порядка десятков лет определяются в основном быстро меняющимися атмосферными и океаническими процессами. Но не следует сбрасывать со счетов влияние и быстрых геофизических процессов, например циклов землетрясений или вулканических изменениями. Если положить в основу анализа самые мощные мегаземлетрясения с магнитудой больше 8 и вызванные ими крупномасштабные деформационные волны в литосфере, то, принимая во внимание физически обоснованные триггерные механизмы, можно построить геодинамическую схему, объясняющую наблюдаемые климатические изменения в Арктике и процессы разрушения ледников в Антарктике. В статье описывается эта новая геодинамическая концепция.

Ключевые слова: Арктика, метастабильные газогидраты, эмиссия метана, потепление климата, Западная Антарктида, разрушение ледников, сильнейшие землетрясения, тектонические волны, триггерный механизм.

DOI: 10.31857/S0869587323060117, EDN: QVPJVY

ЛОБКОВСКИЙ Леопольд Исаевич – академик РАН, научный руководитель геологического направления; заведующий лабораторией ИО им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией МФТИ. БАРАНОВ Алексей Андреевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИТПЗ РАН. ВЛАДИМИРОВА Ирина Сергеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИО им. П.П. Ширшова РАН, старший научный сотрудник ФИЦ ЕГС РАН. АЛЕКСЕЕВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший и сотрудник ИО им. П.П. Ширшова РАН, старший научный сотрудник МФТИ.

СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНАЯ ГИПОТЕЗА ПОВЫШЕНИЯ ЭМИССИИ МЕТАНА И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Новый геодинамический подход основывается на предложенной в работах [1-3] сейсмогенно-триггерной гипотезе резкой активизации эмиссии метана на шельфе и примыкающей обширной территории суши Арктической зоны, вызванной деформационными волнами, возбуждёнными сильнейшими мега-землетрясениями. произошедшими в середине XX в. в Алеутской зоне субдукции. Предполагается, что эмиссия метана происходит в результате освобождения газа из газонасыщенных слабопроницаемых осадочных толщ, а также вследствие разрушения метастабильных газогидратов Арктической зоны под действием триггерного эффекта внешних дополнительных напряжений, связанных с деформационными волнами.

Следует напомнить, что 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 [4]. По существующим оценкам, глобальные запасы газовых гидратов насчитывают около 1000 млрд метрических тонн углерода [5], частичное разложение которых может повлиять на круговорот углерода и климат в глобальном масштабе [6–8]. Анализ глобального потока метана в межгеосферном газообмене свидетельствует о большой роли глубинного потока этого газа, идущего из недр Земли [9].

Идея возможной диссоциации газогидратов и эмиссии метана, обладающего сильным парниковым эффектом, использовалась для объяснения ряда известных явлений, таких как палеоценовый тепловой максимум [6] или быстрое послеледниковое увеличение содержания атмосферного метана [10]. Обсуждалась также гипотеза о возможном влиянии эмиссии метана на глобальное потепление при усилении процессов деградации мерзлоты и диссоциации газогидратов [1, 11–13].

Морские исследования арктического шельфа России показали, что со дна мелководных областей в морях Восточной Арктики происходит значительный выброс метана [13, 14]. Среди многочисленных природных и техногенных газовых проявлений на суше Арктической зоны особое место занимают крупные кратеры, возникшие в результате мощных газовых выбросов [15].

Обычно диссоциацию газогидратов связывают с повышением температуры до критического уровня, при достижении которого теряется стабильность их существования при данном давлении окружающей среды, отвечающем определённой 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 [16], либо с экзогенными факторами, например, с тёплыми придонными течениями на шельфе или трансгрессиями водных масс на холодную поверхность суши в Арктике [13]. Однако потеря устойчивости газогидратов может быть также связана с понижением внешнего давления, вызванного геодинамическими факторами. К ним относится, например, уменьшение гидростатического давления волы на шельфе в результате его обмеления, вызванного изостатическим подъёмом поверхности коры из-за таяния ледников, как это установлено для архипелага Шпицберген в Восточной Арктике [17]. Отмеченные тепловые и геодинамические факторы действуют, как правило, в коротких геологических масштабах времени в пределах голоцена.

Наряду с этим сушествуют и быстродействующие геодинамические факторы, приводящие при определённых 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, испытавших частичную диссоциацию, которая, как показывают эксперименты [18, 19], едва начавшись, может быстро прекратиться в результате образования плёнок льда, запечатывающих возникший свободный газ внутри газогидратных микрочастиц, приводя к явлению самоконсервации газогидратов [14]. Находящиеся длительное время в условиях самоконсервации метастабильные реликтовые газогидраты в дальнейшем могут разрушиться при возникновении дополнительных напряжений, разрушающих тонкие плёнки льда, освобождая таким образом свободный газ и приводя к его фильтрации в трещиновато-пористой среде мёрзлых пород и, в конечном счёте, к эмиссии метана в атмосферу. Анализ механики этого процесса выполнен в работах [20, 21].

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 и в северной части Курильской гряды, наблюдавшейся примерно за 20 лет до начала потепления [1, 2].

В действительности имеет место общая корреляция с двадцатилетним временным сдвигом между ходом выделения сейсмической энергии Земли, с одной стороны, и приращением концен-

527



Рис. 1. Сопоставление графиков изменения средней температуры в Арктике на протяжении XX и начала XXI вв. и выделение сейсмической энергии Земли *Источник:* модифицировано с использованием [22, 23]

трации метана в атмосфере, с другой, наблюдаемая в течение последних 40 лет. На рисунке 1 представлены графики изменения средней температуры в атмосфере и вариаций уровня выделяемой сейсмической энергии Земли в форме сильнейших землетрясений за период XX и начала XXI вв. Верхний график демонстрирует известный факт начала достаточно резкого роста температуры в 1979–1980 гг., который требует объяснения. Из нижнего графика следует, что наибольшая часть сейсмической энергии, определяемой в основном сильнейшими мегаземлетрясениями с магнитудой больше 8.5, выделилась в пределах достаточно короткого промежутка времени (1952–1965). То есть между серией мегаземлетрясений, определившей максимум выделенной сейсмической энергии Земли, и началом роста средней температуры в атмосфере (1979–1980) прошло около 20 лет.



Рис. 2. Распространение тектонических волн в сторону Арктики от сильных землетрясений в Алеутской и Курило-Камчатской зонах субдукции во второй половине XX в.

К этой серии определяющих мегаземлетрясений относятся: во-первых, три землетрясения, произошедшие в районе Алеутской островной дуги (1957 г. в центральной части дуги с магнитудой 8.6, 1964 г. в восточной части дуги с магнитудой 9.3 и 1965 г. в западной части дуги с магнитудой 8.7), во-вторых, землетрясение 1952 г. на Северных Курилах с магнитудой 9.0. К этой же серии относится самое мощное землетрясение за всю историю инструментальных наблюдений, произошедшее в 1960 г. в Чилийской зоне субдукции, с магнитудой 9.5. Важно отметить, что первые четыре определяющих мегаземлетрясения произошли в районах Алеутской островной дуги и северной части Курильской островной дуги, то есть в зонах субдукции северо-западной части тихоокеанской литосферы, наиболее близко расположенных к Арктике, где происходит самое сильное потепление климата.

Согласно сейсмогенно-триггерной гипотезе [1, 2], двадцатилетний временной сдвиг между серией сильнейших мегаземлетрясений, произошедших в ближайших к Арктике Алеутской и Курило-Камчатской зонах субдукции, и началом потепления в Арктике связан с временем пробега деформационных тектонических волн от очагов до Арктического шельфа и сухопутной области Арктики. Эти крупномасштабные волны в литосфере, вызванные сильнейшими мегаземлетрясениями, имея характерную скорость распространения порядка 100 км/год, способны пройти расстояние около 2000 км между очагами землетрясений и арктическими территориями за время около 20 лет (рис. 2).

Как уже отмечалось, собственно механизм потепления климата в Арктике связан с парниковым эффектом от повышенной эмиссии метана из осадочных пород Арктической зоны, содержащих большое количество скоплений газа в свободной форме и в виде частично диссоциированных метастабильных газогидратов. Эмиссия, происходящая как на суше, так и на шельфе Арктики, - следствие разрушения слабопроницаемой структуры мёрзлых пород и общего повышения уровня трещиноватости осадочных толщ за счёт дополнительных напряжений, возникающих в результате прихода деформационных волн литосферы в Арктическую зону из области их генерации в очагах мегаземлетрясений. Таков альтернативный по отношению к антропогенной точке зрения геодинамический механизм потепления климата в Арктике.

В изложенной геолинамической схеме потепления климата ключевое значение имеют деформационные волны в литосфере, которые порождаются происходящими в зонах субдукции катастрофическими мегаземлетрясениями. Характерная скорость этих волн составляет от нескольких десятков до первых сотен км/год. Впервые деформационные волны были теоретически обоснованы в работе немецкого и американского физика и геофизика В. Эльзассера в рамках простой модели взаимодействия упругой литосферы с вязким подстилающим слоем астеносферы [24]. Скорости "диффузии" упругих смещений и напряжений, рассчитанные на основе этой модели, оказались близки к скоростям миграции сейсмической активности, наблюдаемой в различных регионах Земли. Сегодня существуют разные математические модели распространения напряжений и деформаций в литосфере [25-29], на основе которых анализируются особенности миграции сейсмической активности. В предлагаемой нами геодинамической концепции используется новое приложение теории деформационных волн в качестве триггерного воздействия на газонасыщенные осадочные породы, приводящего к эмиссии метана. Существенная особенность нашей модели состоит в учёте не только механических возмущений литосферы, но и тепловых эффектов, связанных с фазовым переходом на границе литосфера-астеносфера, что позволяет объяснить возможность распространения деформационных волн на большие расстояния (порядка нескольких тысяч километров) со слабым затуханием, обеспечивая заметные добавочные напряжения в литосфере [30, 31].

При обосновании сейсмогенно-триггерной гипотезы потепления климата важное значение





a – графики, демонстрирующие глобально осреднённое среднемесячное значение метана в атмосфере [32]; 6 – график годовых приращений атмосферного CH₄ на основе глобально усреднённых данных о морской поверхности [33];
в – сопоставление изменений сейсмической активности Земли и вариаций концентрации метана в атмосфере. Сплошной линией показана огибающая кривая, отражающая изменение среднегодовых приращений концентрации метана в атмосфере. Опрошной линией показана огибающая кривая, отражающая изменение среднегодовых приращений концентрации метана в атмосфере в период 1984–2022 гг. Пунктиром дана кривая вариации уровня сейсмической активности Земли, определяемой крупными землетрясениями с магнитудой больше 8, за период 1964–2002 гг.

имеют прямые измерения концентрации метана в атмосфере, проводимые США с начала 1980-х годов (NOAA Global Monitoring Laboratory measurements) [32].

На рисунке 3 а, б отражены ежегодные измерения средней концентрации метана в атмосфере начиная с 1984 г. по настоящее время. Характерная особенность изменения во времени концентрации газа — различия в скорости её роста для четырёх временны́х интервалов: 1) интервал 1984—1992 гг. характеризуется относительно быстрым ростом концентрации метана; 2) интервал 1992—1999 гг. — замедлением роста концентрации; 3) интервал 1999—2007 гг. демонстрирует почти полное прекращение роста концентрации; 4) интервал 2007—2022 гг. вновь характеризуется быстрым ростом концентрации метана. На рисунке 36 показаны ежегодные приращения средней концентрации метана в атмосфере.

Возникает вопрос: с чем могут быть связаны разные темпы роста содержания метана на протяжении последних 40 с лишним лет? Исходя из сейсмогенно-триггерной гипотезы, следовало бы ожидать, что изменения темпа роста концентрации этого газа в атмосфере должны коррелировать с изменениями уровня выделения сейсмической энергии Земли (с учётом временно́го сдвига порядка 20 лет, связанного с временем пробега деформационных волн от очагов больших землетрясений до мест скопления метана, запертого в осадочных породах прежде всего Арктической зоны). Такую корреляцию иллюстрирует рисунок 3в: две огибающие кривые отражают изменение среднегодовых приращений концентрации мета-



Рис. 4. Очаги сильных землетрясений в чилийских зонах субдукции в 1940—1943 гг. Звёзды соответствуют фокальным зонам

на в атмосфере в период 1984–2022 гг. и вариации уровня сейсмической активности Земли, определяемой сильнейшими землетрясениями с магнитудой больше 8 за период 1964-2002 гг. (с учётом упоминавшегося временного сдвига). Корреляционное подобие двух кривых, на наш взгляд, добавляет весомости аргументу в пользу рассматриваемой гипотезы потепления климата. Некоторые нарушения корреляции могут быть связаны с ростом эмиссии метана из-за других факторов, например, в силу антропогенного воздействия или усиления эмиссии на заболоченных территориях. Такие явления остаются за рамками сейсмогенно-триггерного механизма. Более того, нельзя ожидать абсолютной корреляции рассматриваемых процессов в контексте сейсмогеннотриггерного механизма, учитывая их сложный многофакторный характер.

СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДНИКОВ В ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИКЕ

В последнее время в Антарктике отмечается беспрецедентная скорость потери льда как по площади, так и по объёму. Сток льда в мировой океан идёт через шельфовые ледники, причём часть их просто разрушается. Большинство событий происходит в Западной Антарктике, особенно это касается льдов Антарктического полуострова. Так, за последние десятилетия, начиная с 1970-х годов, площадь его шельфовых ледников сократилась со 150 до 100 тыс. км² [34]. Согласно сейсмогенно-триггерной гипотезе, этот процесс мог начаться из-за прихода деформационных волн от сильнейших мегаземлетрясений наиболее близко расположенной к Антарктике Чилийской зоны субдукции, произошедших в начале 1940-х годов прошлого века (речь идёт о землетрясениях 1940, 1942, 1943 гг. с магнитудой каждого из них 8.2) (рис. 4). Деформационные волны при скорости 100 км/год, пройдя расстояние около 3500 км от очагов генерации в Чилийской зоне субдукции до Антарктического полуострова, спустя 35 лет после тех событий могли привести в 1970-х годах к запуску процесса деградации шельфовых ледников. Следующий цуг деформационных волн в Чилийской зоне субдукции был связан с тремя мегаземлетрясениями, произошедшими в 1960 г., одно из которых (недалеко от г. Вальдивия в Чили) с магнитудой 9.5 оказалось самым мощным за всю историю наблюдений. Через 35 лет эти волны достигли Антарктического полуострова, разрушив в 1995 г. шельфовый ледник Ларсен А (рис. 5).

Сильнейшие землетрясения, произошедшие в Чилийской зоне субдукции и островной дуге Маккуори (рис. 6а, б) позднее, вызвали деформационные волны, которые, достигнув ледников Западной Антарктики, привели к серии частичного разрушения ледников, в числе которых Ларсен В, Ларсен С, Уилкинс, Георг VI [36].

В конце XX – начале XXI вв. южный сегмент Чилийской зоны субдукции испытал аномально высокую сейсмическую активность. В 1995, 2001, 2007, 2010, 2014, 2015 гг. здесь происходили сильнейшие землетрясения с магнитудой больше 8 (рис. 6б). К этой серии следует добавить сильнейшее землетрясение с магнитудой 8.3, произошедшее в 2021 г. в Сандвичевой зоне субдукции, которая смещена относительно южного края Чилийской зоны по трансформному разлому на значительное расстояние в Атлантический океан. Согласно сейсмогенно-триггерной концепции, деформационные волны, вызванные этими землетрясениями, достигнут в грядущие десятилетия Антарктического полуострова, приведя к дальнейшему разрушению ледников Ларсен, Уилкинс, Георг VI и других.

Рассмотрим теперь вопрос эволюции ледников Антарктики, обратив внимание на одно важное обстоятельство: до наступления фазы своего разрушения ледники долгое время (сотни и тысячи лет) находились в стабильном состоянии, а некоторые из них были стабильны на протяжении всего голоцена (около 12 тыс. лет), как, например, ледник Ларсен Б [37]. Такое поведение ледников подчёркивает уникальность современного периода и требует объяснения феномена потери их



Рис. 5. Карта высот поверхности Антарктического полуострова, с обозначением крупнейших в настоящее время шельфовых ледников: Ларсен, Георга VI и Уилкинса, море без шельфового льда обозначено белым *Источник*: модифицировано с использованием [35]

устойчивости именно в наше время. Обычное объяснение происходящих событий сводится к утверждению о воздействии на состояние ледников современного глобального потепления климата. Однако это объяснение вызывает сомнение, поскольку в голоцене, согласно палеоклиматическим данным, температурные максимумы были выше, чем в современную эпоху [38]. Поэтому только за счёт повышения температуры среды трудно объяснить внезапный переход от длительного стабильного состояния ледников к масштабному процессу их разрушения. Альтернативное объяснение предлагает сейсмогенно-триггерная гипотеза, согласно которой быстрое разрушение ледников связано с добавочными напряжениями, принесёнными в Антарктику деформационными волнами, вызванными сильнейшими мегаземлетрясениями, возникающими в окружающих её зонах субдукции – Чилийской, Сандвичевой и Кермадек-Маккуори.

Частота серий сильнейших землетрясений с магнитудой больше 8 в различных зонах субдукции обусловлена структурой "шероховатости" контактной поверхности взаимодействия литосферных плит, от которой зависит разрыв больших площадей контактной зоны при мегаземлетрясениях, а также возникновением условий для накопления критической энергии сразу в нескольких крупных сейсмогенных блоках в определённый момент времени. Подобная сейсмотектоническая ситуация возникает достаточно редко с периодом повторяемости порядка тысячи лет. По всей видимости, для Чилийской и Алеутской зон субдукции такая суперактивная сейсмотектоническая фаза наступила во второй половине XX в. Именно этим, согласно сейсмогенно-триггерной гипотезе, объясняется резкое наступление современной эпохи потепления климата и фазы интенсивного разрушения ледников в Антарктике.

Рассмотрим более предметно гляциологическую и геолого-геофизическую обстановку, характерную для Западной Антарктики. Как отмечалось выше, основная проблема эволюции ледников заключается в объяснении быстрого перехода от стадии стабильности, для которой характерно медленное течение покровных ледников из внутренних областей Антарктиды в сторону окружающего шельфа со скоростью порядка нескольких метров в год. к быстрому перемешению покровных и шельфовых ледников в сторону океана со скоростью несколько километров в год, сопровождаемому интенсивным их разрушением. С точки зрения геомеханики, такой переход может быть связан с изменением режима трения на подошве сползающего с подложки коренных пород покровного ледника или его горизонталь-



Рис. 6. Очаги сильнейших землетрясений в зонах субдукции Чилийской и Кермадек-Маккуори с 1960 по 2000 г. (а); с 2001 по 2020 г. (б). Звёзды соответствуют очаговым областям

ного растекания в зависимости от угла наклона коренного ложа. В "холодных" условиях лёд на подошве ледника крепко сцеплен с породами неподвижного основания, то есть выполняются условия прилипания, и движение ледника подобно медленному течению высоковязкой жидкости. В случае возникновения зон плавления льда на подошве он начинает скользить по основанию



Рис. 7. Карта теплового потока Антарктиды. Вулканы Эребус и Десепшн обозначены звёздочками, прочие — чёрными точками Источник: модифицировано с использованием [39]

при низком трении, что значительно увеличивает общую скорость его движения в сторону океана. Плавление льда на подошве ледника может начаться из-за повышения температуры, вызванного глубинным тепловым потоком из подледниковых областей земной коры.

На рисунке 7 представлена карта распределения теплового потока в Антарктиде. Видно, что повышенные значения теплового потока приурочены к Западной Антарктике, в частности к Антарктическому полуострову, а также к впадинам подлёдного рельефа Бэрда и Бентли и шельфовой окраине моря Росса [39]. Такое распределение теплового потока отвечает интенсивному движению и разрушению ледников в Западной Антарктике в отличие от Восточной, где тепловой поток заметно ниже и пока сохраняется относительная стабильность ледников. Наблюдаемое соответствие областей повышенного теплового потока и высокой степени подвижности и разрушения ледников в Западной Антарктике говорит в пользу представления о скольжении покровных ледников по подплавленному основанию, резко увеличивающем скорость их движения.

Природа повышенного теплового потока связана с особенностями строения и геологической эволюции Западной Антарктиды [40, 41], которые характеризуются прежде всего наличием протяжённой Западно-антарктической рифтовой системы, сопоставимой по масштабам с Восточно-Африканской рифтовой зоной. Западно-антарктическая рифтовая система протягивается на огромное расстояние и включает в себя более 130 идентифицированных подлёдных вулканов [42] с наибольшей их концентрацией в области Земли Мэри Бэрд и бассейнов Бентли и Бэрд (см. рис. 7). В целом распределение вулканов про-



Рис. 8. Режимы движения покровных ледников Западной Антарктики

странственно коррелирует с областями повышенного теплового потока, что логично объясняется недавней активностью этих вулканов.

При анализе связи подлёдных вулканов и зон высокого теплового потока с современным процессом ускоренного движения и разрушения ледников главный вопрос заключается в объяснении момента времени перехода от стабильного состояния ледников к разрушительной фазе, начавшейся в 1970-х годах прошлого века, поскольку геологическая эволюция коры и литосферы, сопровождаемая рифтогенезом и вулканизмом, длится миллионы и даже десятки миллионов лет. Поэтому должен существовать какой-то триггерный механизм, который мгновенно, по-сравнению с масштабом геологической эволюции, переводит стабильное состояние ледников в разрушительную фазу. Этим механизмом служат деформационные волны, приходящие в Антарктиду от очагов сильнейших землетрясений в ближайших зонах субдукции, которые активизируют спящие вулканы, вызывая резкое повышение теплового потока под ледниками, что приводит к плавлению льда на подошве ледника и развитию его быстрого скольжения по коренному ложу в сторону океана. Эти же волны, благодаря дополнительным напряжениям, могут разрушать участки механического сцепления льда с коренными породами, где

плавление льда ещё не наступило, приводя к небольшим землетрясениям, регистрируемым сейсмическими станциями на поверхности ледников.

На рисунке 8 представлена упрощённая схема режимов движения покровных и шельфовых ледников, отражающая разные термомеханические условия их эволюции. Первая, начальная, стадия эволюции соответствует режиму медленного течения льда подобно высоковязкой жидкости с прилипанием на подошве ледника к неподвижному основанию из коренных пород. Вторая, "тёплая", стадия характеризуется повышенным подогревом ледника снизу, приводящим к плавлению льда на подошве в отдельных областях, и его скольжением вдоль основания в местах плавления при наличии "сухих" участков, где сохраняются условия прилипания. Увеличение теплового потока снизу и частичное плавление связано с пробуждением подлёдных вулканов, вызванным триггерным механизмом деформационных волн, пришедших в Антарктику от очагов сильнейших землетрясений. Третья стадия характеризуется ещё большим ускорением сползания ледника в результате механического разрушения незатронутых плавлением сухих зон сцепления ледника с основанием, вызванного триггерным

эффектом добавочных напряжений от деформационных волн.

Таким образом, в предлагаемой схеме (см. рис. 8) большое значение придаётся триггерной активизации подлёдных вулканов. Подтвердить механизм пробуждения спящих подлёдных вулканов действием деформационных волн прямыми наблюдениями сегодня вряд ли возможно. Однако в пользу этого механизма можно привести данные о пространственно-временной корреляции между сильнейшими землетрясениями с очагами вокруг Антарктиды и действующими наземными вулканами, а именно: вулканом Десепшен, находящимся вблизи края Антарктического полуострова, и вулканом Эребус, расположенным вблизи моря Росса (см. рис. 7). Вулкан Десепшен был активен в период 1967–1970 гг. Эта активность могла быть вызвана серией упоминавшихся мегаземлетрясений с магнитудой больше 8, произошедших в Чилийской зоне субдукции в начале 1940-х годов. Предполагается что деформационные волны от их очагов подошли к вулкану Десепшен через 25-30 лет и, благодаря дополнительным напряжениям, инициировали вулканическую деятельность. Вулкан Эребус многократно проявлял эффузивную активность на протяжении XX в. Особенно сильные извержения происходили в 1972-1974 гг. Необычно высокая частота извержений Эребуса наблюдалась и в первые два десятилетия XXI в. (2005, 2006, 2008, 2011, 2015, 2018 гг.). Из сильнейших землетрясений, произошедших в XX в. на довольно больших расстояниях от Антарктиды, можно выделить серию из четырёх мегаземлетрясений, произошедших в 1917-1920 гг. в зоне субдукции Кермадек: два в 1917 г. с магнитудами 8.2 и 8.5; в 1919 г. и 1920 г. с магнитудой 8.1. Расстояние от очагов этих землетрясений до вулкана Эребус около 5500-6000 км, так что за примерно 55 лет деформационные волны могли достигнуть вулкана, вызвав извержения в 1972-1974 гг. (рис. 9).

Что касается отмеченной выше серии частых извержений Эребуса в начале XXI в., то она хорошо объясняется двумя мегаземлетрясениями, произошедшими в зоне Маккуори в 1989 г. и на Южном тихоокеанском поднятии в 1998 г. (рис. ба). Относительно небольшой сдвиг по времени около 15–20 лет между рассматриваемыми геодинамическими событиями объясняется значительно меньшим расстоянием между очагами этих землетрясений и вулканом Эребус (около 1700– 2900 км) по сравнению с расстояниями от Эребуса до очагов зоны субдукции Кермадек.

Таким образом, мы приходим к определённой сейсмогенно-триггерной модели эволюции покровных ледников Западной Антарктики с резким переходом от режима стабильности, характеризующегося медленным вязким течением ледников в



Рис. 9. Очаги сильнейших землетрясений, произошедших с 1917 по 1920 г. в зоне субдукции Кермадек. Звёзды соответствуют очаговым областям

течение нескольких тысяч лет, к ускоренному их скольжению в сторону океана и разрушению передовых частей и примыкающих шельфовых ледников. Такой переход связан с действием деформационных волн, вызванных большими мегаземлетрясениями, происходящими вокруг Антарктики, которые активизируют подлёдные вулканы, приводящие к повышению теплового потока и плавлению подошвы ледников, что вызывает их быстрое движение и разрушение (рис. 7).

Рассмотрим гляциологические особенности движения покровных ледников в Западной Антарктике. Такое движение существенно зависит от рельефа, свойств подстилающего коренного ложа и от переменной толщины ледяного покрова. Например, в условиях Антарктического полуострова покровные ледники стекают с высокого и узкого Антарктического хребта по наклонному коренному ложу в море, трансформируясь в шельфовые ледники, плавающие в воде в форме более тонких пластин льда толщиной в несколько сотен метров. Основной механизм разрушения шельфовых ледников – дезинтеграция и коллапс, другими словами, превращение монолита в меланж – ледяную кашу из небольших фрагментов льда. После разрушения шельфовых ледников скорости стекания находящихся за ними покровных ледников увеличиваются в разы, а высота их уменьшается, поскольку блокирующий эффект шельфовых ледников уменьшается.

Вместе с тем следует отметить, что существенного повышения уровня моря массовое разруше-



Рис. 10. Скорость движения льда Западно-Антарктического ледяного щита, установленная по мультисенсорным данным за период 2014—2016 гг. с модификациями [43, 44]. Чёрными линиями обозначена площадь водосбора для каждого дренируемого ледяного потока с использованием данных об уклоне поверхности и направлении потока льда

 шельфовый ледник Ларсена С; 2 – шельфовый ледник Фильхнера–Ронне; 3 – ледник Пайн-Айленд;
4 – ледник Туэйтса; 5 – шельфовый ледник Росса

ние шельфовых ледников Антарктического полуострова не даёт, так они плавают в воде и находятся в состоянии изостатического равновесия. Уровень моря увеличивает только ускоренный сток покровных ледников полуострова, но они небольшие. По различным оценкам, повышение уровня моря за счёт полного сползания ледников Антарктического полуострова в море составит десятки сантиметров.

Иная ситуация в основной, более южной части Западной Антарктиды. Для неё характерен повышенный тепловой поток в области Западно-антарктической рифтовой системы, наличие подлёдных вулканов и, в отличие от Антарктического полуострова, находящаяся ниже уровня моря поверхность основания коренных пород. Основной сток льда центральной и наиболее возвышенной части Западной Антарктиды происходит по четырём направлениям: в сторону ледников Филхнера–Ронне, Росса, Пайн и Туэйтс (ледника Судного Дня) (рис. 10). Для трёх последних характерен большой тепловой поток, однако скорости стекания льда в океан для Филхнера–Ронне и Росса меньше, чем для Пайн и Туэйтс [43]. Кроме того, для двух последних шельфовая их часть относительно мала и за ней сразу идут покровные ледники, тогда как для Филхнера—Ронне и Росса шельфовая часть составляет сотни километров, так что покровные ледники, способные вызвать значительное повышение уровня моря при их погружении в воду, находятся на достаточно большом расстоянии от внешнего края шельфовых ледников.

Основные опасения вызывают ледники Пайн и Туэйтс - скорости их выводных участков в последнее время увеличились в разы и составляют километры в год относительно их границ заземления [43]. На рисунке 10 цифрами 3 и 4 обозначены сползающие со скоростями 3 км/год и более языки этих двух ледников. Размеры их сравнимы, и гипотетический прямой вклад каждого из них в повышение уровня океана может составить около 51 и 65 см соответственно [44]. Основные потери льда в последние десятилетия ассоциируются именно с этими ледниками [44]. В районах их расположения присутствуют активные вулканы (рис. 7) [42]. К примеру, в 2018 г. было установлено, что тепловой поток от подлёдного вулкана в районе ледника Пайн составляет около половины величины теплового потока от активного наземного вулкана Гримсвот в Исландии [45].

Движение выводных ледников Туэйтс и Пайн обусловливается гравитационным растеканием гигантской линзы льда толщиной до 4000 м в центральной части Западной Антарктиды. Математическое моделирование этого процесса, основанное на численном решении уравнений Стокса для движения вязкой жидкости с учётом нелинейной реологии льда (закон Глена), показывает, что скорости течения при условии прилипания на нижней границе составляют десятки метров в год, а при условии скольжения — километры в год [46, 47]. В настоящее время для ледников Туэйтс и Пайн характерны в основном условия скольжения на нижней границе со скоростями течения льда километры в год. Такие большие скорости движения льда больше нигде на континенте не наблюдаются (см. рис. 10).

Как отмечалось выше, основной причиной возникновения условий скольжения покровных ледников по коренному основанию служит повышенный тепловой поток в Западной Антарктике, который создаёт потенциальные условия для плавления льда на подошве ледников. Однако процесс плавления неравномерен во времени и пространстве. Согласно сейсмогенно-триггерной концепции, плавление начинается в отдельных зонах на подошве ледников, где активизируются подлёдные вулканы благодаря приходу деформационных волн от очагов мегаземлетрясений вблизи Антарктики. Этим обусловлен резкий пе-

2023

№ 6

реход ледников Туэйтс и Пайн от стабильного состояния, длящегося тысячи лет, к ускоренному движению, которое наблюдается лишь в последние десятилетия/годы. Ранее (в последние столетия) подобные ускорения также имели место [48]. Скольжение льда на нижней границе может привести к быстрому сползанию шельфовых частей ледников Пайн и Туэйтс в море, что откроет дорогу для более быстрого гравитационного растекания ледяной линзы центральной части Западной Антарктиды именно в сторону ледников Пайн и Туэйтс. В этом случае глобальное повышение уровня моря может составить 2-3 м за счёт вытеснения океанической воды громадными массами льда, до этого лежавшими на коренном ложе. В отличие от медленного таяния льда катастрофический процесс сползания покровных ледников может произойти за относительно короткое время.

* * *

В заключение следует подчеркнуть, что описанная здесь сейсмогенно-триггерная геодинамическая концепция роста эмиссии метана и связанного с этим потепления климата, прежде всего в Арктике, а также ускоренного движения и разрушения ледников в Антарктике, происходящих с конца 1970-х годов до настоящего времени, не отрицает доминирующую сегодня антропогенную теорию глобального потепления климата. Мы и не ставили своей целью критику этой теории. Нашей задачей было показать, что существует альтернативная геодинамическая точка зрения на причины возникновения аномальных явлений в полярных областях. Геодинамический подход как минимум может дополнить антропогенную теорию в некоторых аспектах описываемых явлений. Вместе с тем нельзя исключить того, что в будущем предлагаемый нами подход может оказаться вполне адекватным для объяснения существенных особенностей процессов, протекающих в полярных регионах Земли в современную эпоху.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004 и частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений РАН № АААА-А19-119011490131-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-62-72

- Lobkovsky L.I. Seismogenic-triggering mechanism of gas emission activizations on the Arctic shelf and associated phases of abrupt warming // Geosciences. 2020.
 V. 10. № 11. Article number 428. https://doi.org/10.3390/geosciences10110428
- 3. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M. et al. 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. Article number 372. https://doi.org/10.3390/geosciences12100372
- Матвеева Т.В. Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках // Мировой океан. Т. 3. Твёрдые полезные ископаемые и газовые гидраты / Под ред. Л.И. Лобковского и Г.А. Черкашева. М.: Научный мир, 2018. С. 586–694.
- Wallmann K., Pinero E., Burwicz E. et al. The global inventory of methane hydrate in marine sediments: a theoretical approach // Energies. 2012. № 5. P. 2449–2498.
- 6. 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. № 10. P. 965–971.
- Maslin M., Owen M., Day S., Long D. Linking continental slope failure and climate change: testing the clathrate gun hypothesis // Geology. 2004. V. 32. № 1. P. 53–56.
- Ruppel C.D., Kessler J.D. The interaction of climate change and methane hydrates // Rev. Geophys. 2017. V. 55. P. 126–168.
- 9. Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б. Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2003. Т. 391. № 6. С. 813-816.
- 10. *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.
- 11. *Kvenvolden K.A.* Methane hydrates and global climate // Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. № 2. P. 221–229.
- Koven C.D., Ringeval B., Friedlingstein P. et al. Permafrost carbon-climate feedback accelerated global warming // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2011. V. 108(36). P. 14769–14774.
- 13. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East SiberianArctic Shelf: Towards further assessment of permafrost related methane flux and role of sea ice // Nature Comm. 2017. № 8. Article number 15872. geosciences12100372
- 14. *Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al.* Dissociation and Self-Preservation of Gas Hydrates in Permafrost // Geosciences. 2018. V. 8. № 12. Article number 431.
- 15. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. V. № 2. Article number 71.
- Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В. Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Доклады РАН. Науки о Земле. 2019. Т. 486. № 3. С. 354–358.
- 17. Wallman K., Riedel M., Hong W.L. et al. Gas hydrate dissociation off Svalbard induced by isostatic rebound

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 93 № 6 2023

ratherthan global warming // Nature Comm. 2018. N $_{9}$ 9. Article number 83.

- Davidson D.W., Garg S.K., Gough S.R. et al. Laboratory analysis of naturally occurring gas hydrate from sediment of the Gulf Mexico // GCA. 1986. V. 50. P. 619– 623.
- Yakushev V.S., Istomin V.A. Gas hydrates self-preservation effect. In Physics and Chemistry of ice / Eds. Maeno N., Hondoh T. Hokkaido Univ. Press: Sapporo, Japan. 1992. P. 136–140.
- Баренблатт Г.И., Лобковский Л.И., Нигматулин Р.И. Математическая модель истечения газа из газонасыщенного льда и газогидратов // Доклады РАН. Науки о Земле. 2016. Т. 470. № 4. С. 721–754.
- 21. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. К теории фильтрации с двойной пористостью // Доклады РАН. Науки о Земле. 2019 Т. 484. № 3. С. 348–351.
- Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // Earth and Planetary Science Letters. 2015. № 409. P. 133–146.
- Climate at a Glance: Global Time Series // NOAA National Centers for Environmental information. https://www.ncei.noaa.gov/cag/ (дата обращения 15.09.2022).
- 24. *Elsasser W.M.* Convection and stress propagation in the upper mantle. The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors / Ed. by *S.K. Runcorn.* N.Y.: John Wiley, 1969. P. 223–246.
- Melosh H.J. Nonlinear stress propagation in the Earth's upper mantle // J. Geophys. Res. 1976. V. 32. P. 5621– 5632.
- 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.
- Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182.
- 29. *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.
- Гарагаш И.А., Лобковский Л.И. Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. № 1. С. 42–50.
- 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.
- 32. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-02.
 - https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10
- Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M., Masarie K.A. The growth rate and distribution of atmospheric methane // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 17021–17043. https://doi.org/10.1029/94JD01245
- 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. № 4. P. 77–98.

- 35. *Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G. et al.* Bedmap 2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // Cryosphere. 2013. № 7. C. 375–393.
- Wang S., Liu H., Jezek K. et al. Controls on Larsen C Ice Shelf retreat from a 60-year satellite data record // J. Geophys. Res. 2022. V. 127. e2021JF006346.
- Domack E., Duran D., Leventer A. et al. Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch // Nature. 2005. V. 436. P. 681–685. https://doi.org/10.1038/nature03908
- Kaufman D.S., Broadman E. Revisiting the Holocene global temperature conundrum // Nature. 2023. V. 614. P. 425–435. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05536-w
- Lösing M., Ebbing J., Szwillus W. Geothermal heat flux in Antarctica: Assessing models and observations by Bayesian inversion // Front. Earth Sci. 2020. V. 8. Article number 105. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00105
- Baranov A., Tenzer R., Morelli A. Updated Antarctic Crustal Model // Gondwana Res. 2021. V. 89. P. 1–18. https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.010
- 41. *Baranov A., Morelli A., Chuvaev A.* ANTASed An Updated Sediment Model for Antarctica // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. 722699. https://doi.org/10.3389/feart.2021.722699
- 42. van Wyk de Vries M., Bingham R., Hein A. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // Geol. Soc. Spec. Publ. 2018. V. 461. № 1. Article number 231. https://doi.org/10.1144/SP461.7
- Mouginot J., Rignot E., Scheuchl B. Continent-wide, interferometric SAR phase, mapping of Antarctic ice velocity // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 9710–9718. https://doi.org/10.1029/2019GL083826
- 44. *Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B. et al.* Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017 // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2019. V. 116. P. 1095–1103. https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116
- 45. Loose B., Naveira Garabato A.C., Schlosser P. et al. Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier // Nat. Commun. 2018. V. 9. Article number 2431. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04421-3
- 46. Winkelmann R., Martin M.A., Haseloff M. et al. The Potsdam Parallel Ice Sheet Model (PISM-PIK) – Part 1: Model description // The Cryosphere. 2011. № 5. P. 715–726.
- 47. *Pattyn F.* Sea-level response to melting of Antarctic ice shelves on multi-centennial timescales with the fast Elementary Thermomechanical Ice Sheet model (f. ETISh v1.0) // The Cryosphere. 2017. № 11. P. 1851–1878.
- Graham A.G.C., Wåhlin A., Hogan K.A. et al. Rapid retreat of Thwaites Glacier in the pre-satellite era // Nat. Geosci. 2022. V. 15. P. 706–713. https://doi.org/10.1038/s41561-022-01019-9