

Научная статья
УДК 550.344.385
DOI: 10.31857/S0869769824040022
EDN: IRKHNM

Трудности обоснования антропогенной концепции глобального потепления и сейсмогенно-триггерный механизм климатических изменений

Л.И. Лобковский, И.П. Семилетов, А.А. Баранов[✉], И.С. Владимирова

Леопольд Исаевич Лобковский

академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
Международный Центр Дальневосточных и Арктических морей им. адмирала С.О. Макарова,
Сахалинский государственный университет-СахалинГЕШ, Южно-Сахалинск, Россия
lobkovsky@ocean.ru
<http://orcid.org/0000-0002-8033-8452>

Игорь Петрович Семилетов

член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
Международный Центр Дальневосточных и Арктических морей им. адмирала С.О. Макарова,
Сахалинский государственный университет-СахалинГЕШ, Южно-Сахалинск, Россия
ipsemiletov@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

Алексей Андреевич Баранов

кандидат физико-математических наук
Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия
aabanov@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-7793-5555>

Ирина Сергеевна Владимирова

кандидат физико-математических наук
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
vladis@gsras.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7301-7183>

Аннотация. Обсуждаются трудности обоснования антропогенной концепции глобального потепления и предлагается сейсмогенно-триггерный механизм климатических изменений. Суть этого механизма состоит в том, что метан, содержащийся в микропорах мерзлых пород в запертом состоянии, может быть освобожден в результате разрушения микроструктуры среды из-за добавочных напряжений, вызванных триггерным эффектом деформационных волн, проходящих через газонасыщенные области осадочных толщ. Сами волны генерируются сильнейшими землетрясениями, происходящими в зонах субдукции. При характерной скорости деформационных волн порядка 100 км/год они

проходят расстояние около 2000–2500 км от Алеутской и Курило-Камчатской зон субдукции до Арктической зоны примерно за 20–25 лет. Это соответствует разнице во времени между серией наиболее мощных землетрясений с магнитудой больше 8,5, произошедших в этих зонах в интервале 1952–1965 гг., и началом резкого потепления климата в 1980 г. После запуска процесса фильтрации газа в результате разрушения микроструктуры пор и резкого повышения проницаемости геосреды вследствие воздействия деформационной волны процесс эмиссии метана может продолжаться автономно в течение десятков и даже сотен лет в зависимости от толщины нарушенного газонасыщенного слоя. Этим объясняется продолжающаяся эмиссия метана на арктическом шельфе последние сорок с лишним лет после инициировавших ее сильнейших землетрясений середины прошлого века.

Ключевые слова: сильнейшие землетрясения, потепление климата, Арктика, газгидраты, эмиссия метана, триггерный механизм, деформационные волны

Для цитирования: Лобковский Л. И., Семилетов И. П., Баранов А. А., Владимирова И. С. Трудности обоснования антропогенной концепции глобального потепления и сейсмогенно-триггерный механизм климатических изменений // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 4. С. 44–59.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824040022>

Финансирование. Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004, частично при поддержке РФФ, грант № 21-77-3001, частично при поддержке Минобрнауки в рамках Программы развития «Приоритет-2030» Сахалинскому государственному университету, и частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений РАН № АААА-А19-119011490131-3.

Original article

Difficulties in the anthropogenic concept of global warming and the seismogenic trigger mechanism of climate change

L. I. Lobkovsky, I. P. Semiletov, A. A. Baranov, I. S. Vladimirova

Leopold I. Lobkovsky

Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
International Center of the Far-Eastern and Arctic Seas (named by admiral S.O. Makarov), Sakhalin State University/SakhTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
llobkovsky@ocean.ru
<http://orcid.org/0000-0002-8033-8452>

Igor P. Semiletov

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Professor V. I. Il'yichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
International Center of the Far-Eastern and Arctic Seas (named by admiral S.O. Makarov), Sakhalin State University/SakhTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ipseiletov@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1741-6734>

Alexey A. Baranov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics
Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia
aabaranov@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-7793-5555>

Irina S. Vladimirova

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

vladis@gsras.ru

<http://orcid.org/0000-0002-7301-7183>

Abstract. Difficulties in the anthropogenic concept of global warming are discussed and a seismogenic trigger mechanism for climate change is proposed. The essence of this mechanism is that methane contained in the micropores of frozen rocks in a locked state can be released as a result of the destruction of the microstructure of the environment due to additional stresses caused by the trigger effect of deformation waves passing through gas-saturated areas of sedimentary strata. The waves themselves are generated by the strongest earthquakes that occur in subduction zones. With a characteristic speed of deformation waves of the order of 100 km/year, they travel a distance of about 2000–2500 km from the Aleutian and Kuril-Kamchatka subduction zones to the Arctic zone in approximately 20–25 years. This corresponds to the time difference between a series of the most powerful earthquakes with a magnitude greater than 8.5, which occurred in these zones in the interval 1952–1965, and the beginning of a sharp climate warming in 1980. After the start of the gas filtration process as a result of the destruction of the pore microstructure and a sharp increasing the permeability of the geomedium due to the impact of a deformation wave, the process of methane emission can continue autonomously for tens and even hundreds of years, depending on the thickness of the disturbed gas-saturated layer. This explains the ongoing emission of methane on the Arctic shelf for the last forty-odd years after the strongest earthquakes of the middle of the last century that initiated it.

Keywords: large earthquakes, climate warming, Arctic, gas hydrates, methane emission, trigger mechanism, deformation waves

For citation: Lobkovsky L.I., Semiletov I.P., Baranov A.A., Vladimirova I.S. Difficulties in the anthropogenic concept of global warming and the seismogenic trigger mechanism of climate change. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(4):44–59. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824040022>

Funding. The work was carried out partially within the framework of the state assignment of the Institute of Oceanology named after. P.P. Shirshov RAS N FMWE-2021-0004, partially with the support of the Russian Science Foundation, grant N 21-77-3001, partially supported by the Ministry of Education and Science within the framework of the Priority-2030 Development Program to Sakhalin State University and partly within the framework of the state task of the Institute of Earthquake Forecast Theory of the Russian Academy of Sciences N AAAA-A19-119011490131-3.

Введение

Согласно доминирующей в международном климатическом сообществе точке зрения о причинах современного потепления климата, данное явление вызвано в основном парниковым эффектом от промышленных выбросов углекислого газа в атмосферу. Взятое за аксиому, такое представление привело к ряду международных соглашений (Киотский протокол, Парижское соглашение и др.) по ограничению выбросов углекислого газа и заключению о необходимости быстрого перехода мирового сообщества к низкоуглеродной «зеленой» экономике. Однако, как показано в работе [1], такой односторонний подход к климатической проблеме является контрпродуктивным, так как не признает приоритета социально-экономических аспектов устойчивого развития общества. Наряду с этим все больше вопросов возникает при анализе исходных данных, положенных в основу антропогенной концепции потепления климата. Так, большую роль в обосновании данной концепции сыграла представленная одним из ее главных апологетов американским климатологом М. Манном картина изменения средней температуры Земли за последнюю тысячу лет в форме так называемой хоккейной клюшки, демонстрирующая резкий подъем температуры начиная с 1980 г. на фоне тысячелетнего периода относительно постоянного температурного уровня (рис. 1).

На рис. 1 показаны температуры за последние 2 тысячелетия (синий цвет) по отношению к средним значениям температуры 1850–1900 гг. (черный цвет). Заштрихованная область содержит доверительный интервал 68% [3, 4]. Эта картина фигурировала как одно из главных доказательств справедливости продвигаемой антропогенной концепции в нескольких

отчетах Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) начиная с конца 90-х годов предыдущего столетия. Однако широко разрекламированную среди различных слоев общества картину «хоккейной клюшки» нельзя признать адекватной, поскольку она игнорирует хорошо задокументированный средневековый температурный оптимум, а именно: в период X–XIII вв. температура Земли была сопоставима с сегодняшней при практически полном отсутствии в средние века промышленных выбросов углекислого газа в атмосферу (рис. 2).

На рис. 2 показаны графики реконструированной средней температуры Земли за последнюю тысячу лет: красным цветом показана глобальная температура из отчета МГЭИК 1990 г. [5] на основе температур центральной Англии [8], синим цветом показана глобальная температура из отчета МГЭИК 2001 г. [6] на основе работы [9], черным цветом показана глобальная температура из работы [7]. Хорошо видна существенная разница температурных кривых, опубликованных в отчетах МГЭИК за 1990 г. (красная кривая) и за 2001 г. (синяя кривая),

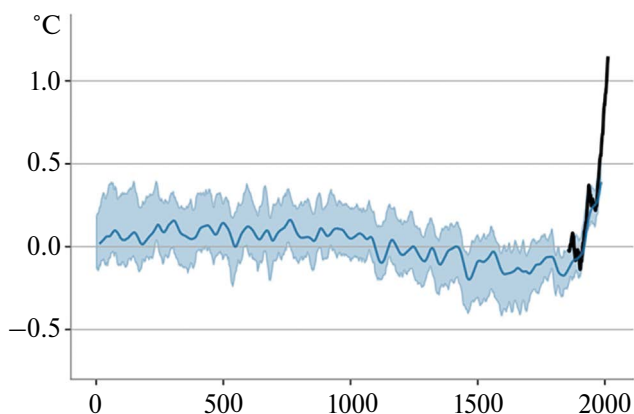


Рис. 1. Картина изменения средней температуры Земли за последние две тысячи лет. Синяя кривая – восстановленный по различным данным график температуры, синяя область – доверительный интервал, черным показана температура в инструментальный период [2], модифицировано.

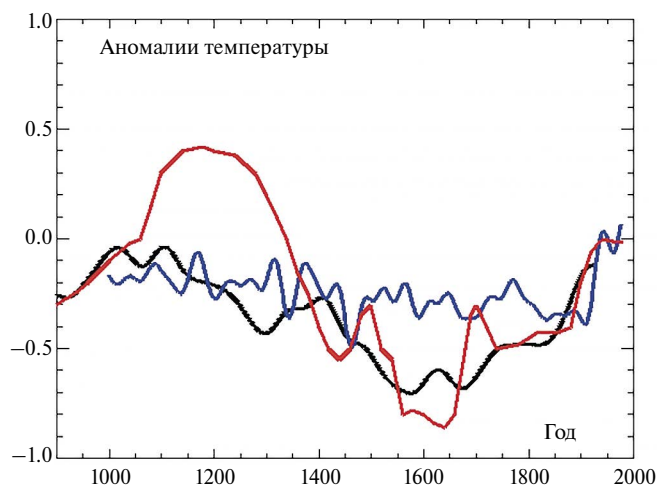


Рис. 2. Изменение средней температуры Земли за последнюю тысячу лет. Красный график – глобальная температура из отчета МГЭИК 1990 г. [5], модифицировано; синий график – глобальная температура из отчета 2001 г. [6], модифицировано; черный график – глобальная температура из работы [7], модифицировано.

а именно: в более позднем отчете исчезло значительное потепление, отвечающее уже упомянутому средневековому оптимуму. В дальнейшем выяснилось, что такая «модернизация» температурной кривой была сделана специально, чтобы убедить мировую общественность в абсолютной уникальности современного потепления климата и получить таким образом якобы неопровержимые доказательства справедливости утверждения об антропогенной природе глобального потепления. Отмеченная фальсификация данных, произведенная американским климатологом М. Манном и некоторыми его коллегами, получившая название «Климатгейт», была устранена в более позднем докладе МГЭИК 2013 г., где признается реальность теплой средневековой климатической аномалии (Medieval Climate Anomaly) в период с 950 по 1250 г. [10]. Однако доверие к аргументам активных сторонников антропогенной концепции потепления этим эпизодом было серьезно подорвано.

Другие сомнения в справедливости антропогенной концепции возникают при сопоставлении временного хода изменения средней температуры и объемов выброса углекислого газа в современную эпоху в XX и XXI вв. Исходя из этой концепции, естественно было ожидать, что должна наблюдаться прямая корреляция между объемами выбросов углекислого газа и изменениями температуры среды. Однако, как видно на рис. 3, имеет место фактически антикорреляция этих параметров для центральной части графика за период с 1940 по 1975 г. На нем показаны фазы потепления и похолодания климата в XX–XXI вв. в сравнении с изменениями объемов промышленных выбросов CO_2 в атмосферу. В частности, периоду 1945–1975 г. наиболее быстрого увеличения объемов выбросов CO_2 отвечает период относительного похолодания Земли, что находится в явном противоречии с антропогенной концепцией. Далее, начавшемуся резкому потеплению климата в районе 1980 г. соответствует локальный спад выбросов. Наконец, периоду подъема температуры 1920–1938 г. отвечает примерно одинаковый уровень выбросов CO_2 . Показанное на рис. 3 отсутствие ожидаемой хотя бы качественной корреляции между средней температурой и объемами промышленных выбросов CO_2 на существенных отрезках временной шкалы вряд ли может свидетельствовать в пользу антропогенной концепции потепления климата.

Отмеченные трудности в обосновании этой концепции предопределяют поиск альтернативных подходов к объяснению феномена потепления климата в короткопериодных масштабах времени порядка первых десятков лет. Если обратиться к быстрым крупномасштабным природным процессам геодинамического характера, обладающим большой мощностью, способным потенциально влиять на глобальную климатическую систему, то возможными

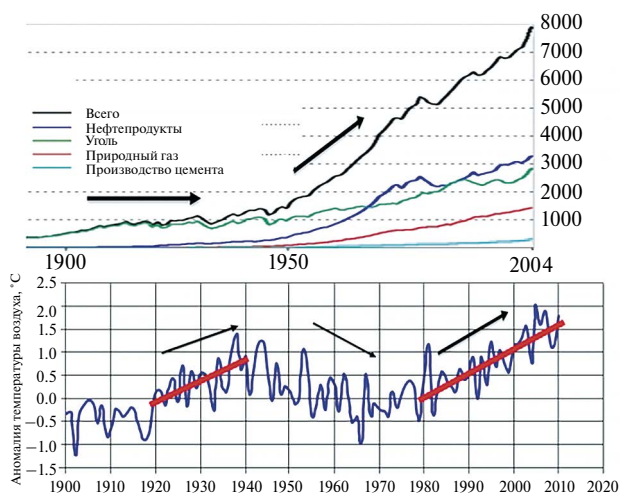


Рис. 3. Сопоставление графика объемов выбросов CO_2 [11] и графика изменения средней температуры в Арктике на протяжении XX и начала XXI в. (исследования Арктического и Антарктического научно-исследовательского института), модифицировано. Красными жирными линиями показаны фазы быстрого потепления.

кандидатами предположительно могли бы выступить крупнейшие вулканические извержения или серии сильнейших землетрясений, происходящие в основном в зонах субдукции. Следует, однако, отметить, что крупнейшие вулканические извержения, как правило, приводят к похолоданию климата из-за выбросов огромных масс пепла в атмосферу, закрывающего большие площади поверхности Земли от солнечной инсоляции. Поэтому для объяснения потепления климата с позиций современной геодинамики остается версия возможного воздействия на климат сильнейших землетрясений. Такая точка зрения была впервые предложена в 2020 г. одним из авторов данной работы в виде сейсмогенно-триггерной гипотезы о генерации массивированной эмиссии метана из мерзлых пород арктического шельфа и прилегающих сухопутных областей мерзлоты, вызванной деформационными волнами, идущими от наиболее близко расположенных к Арктике зон субдукции, Алеутской и Курило-Камчатской, где иногда происходят сильнейшие землетрясения с магнитудами больше 8,5 [12–14]. В этих работах было показано, что начало современного резкого потепления в 1979–1980 г. можно объяснить деформационными волнами, пришедшими в Арктическую зону примерно через 20–25 лет после возникновения серии сильнейших землетрясений с магнитудами больше 8,5 в Алеутской зоне и северной части Курило-Камчатской зоны субдукции, которые произошли в интервале 1952–1965 гг. Деформационные волны, вызванные серией сильнейших землетрясений в указанных островных дугах, прошли расстояние 2000–2500 км между ними и Арктической зоной при средней скорости 100 км/год за 20–25 лет, приведя, благодаря триггерному механизму добавочных напряжений, к массивированным выбросам метана из осадочной толщи в атмосферу и соответствующему парниковому эффекту. Аналогичные сейсмогенно-триггерные процессы предположительно имеют место в Антарктике и окружающих ее зонах субдукции, результатом которых также стало разрушение подледных газгидратов, ускорение движения и разрушения ледников, начавшееся в 70-х годах прошлого столетия. В настоящей работе приводятся фактические данные и геодинамические оценки, развивающие и дополняющие сейсмогенно-триггерную гипотезу в приложении в основном к Арктическому региону.

Корреляция между уровнем сейсмической активности, интенсивностью эмиссии метана и климатическими изменениями

Как отмечалось выше, в основе альтернативной концепции потепления лежит представление о массивированных выбросах метана из мерзлых осадочных пород арктического шельфа и прилегающих областей суши в результате триггерного механизма деформационных волн, идущих от очагов сильнейших землетрясений в Алеутской и Курило-Камчатской зонах субдукции. Наблюдается временной сдвиг на 20–25 лет между максимальной сейсмической активностью Земли в XX в., приходящейся на интервал 1952–1965 гг., и началом резкого потепления климата в 1979–1980 гг. (рис. 4).

Этот сдвиг связан с временем пробега деформационных волн от зон субдукции до Арктической зоны с характерной скоростью порядка 100 км/год. На рис. 5 показаны очаги серии сильнейших землетрясений в Алеутской и Курило-Камчатской островных дугах и условные траектории движения деформационных волн в сторону Арктики.

Как уже отмечалось, собственно механизм потепления климата в Арктике связан с парниковым эффектом от повышенной эмиссии метана из осадочных пород шельфа и суши Арктической зоны, содержащих большое количество скоплений газа в свободной форме и в виде частично диссоциированных метастабильных газгидратов. Эта гипотеза была предложена на основе открытия экстремально высоких концентраций атмосферного и растворенного метана в морях Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское), которые представляют самый широкий и мелководный шельф Мирового океана, где находится более 80% всей подводной мерзлоты и гигантские запасы мелкозалегающих арктических гидратов [17, 18]. На протяжении последних лет было документировано нарушение сплошности подводной мерзлоты, что привело к формированию каналов пузырьковой газовой разгрузки с расходом, значительно превышающим эмиссию метана из всего Мирового океана [19–21]. Авторский обзор основных исследований, выполненных в этом направлении, приведен в [22].

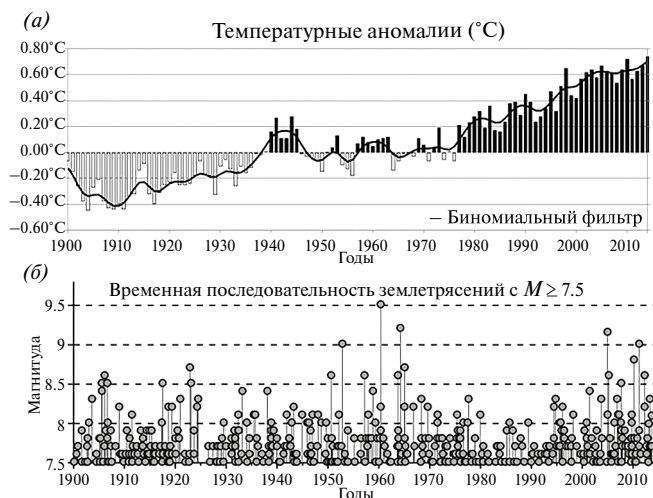


Рис. 4. Сопоставление графиков: *a* – изменения средней температуры в Арктике на протяжении XX и начала XXI в. [15], модифицировано; *б* – временной последовательности сильнейших землетрясений согласно [16], модифицировано.

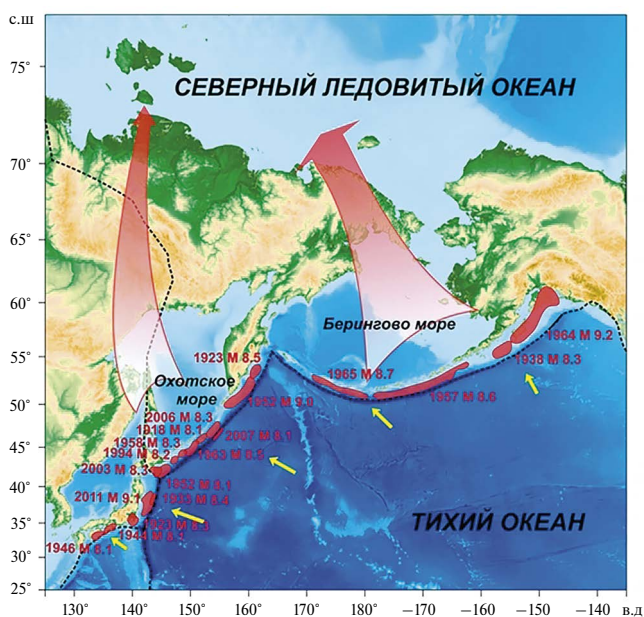


Рис. 5. Распространение деформационных волн в Арктический регион, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской и Курило-Камчатской зонах субдукции.

Эмиссия, происходящая как на суше, так и на шельфе, – следствие разрушения слабопроницаемой структуры мерзлых пород и общего повышения уровня трещиноватости осадочных толщ за счет 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 современного резкого потепления климата в Арктике.

На рис. 6 показано, как изменение уровня моря влияет на стабильность арктических газидратов: в последний ледниковый период уровень моря был понижен примерно

на 100 м [6, 17], и дно мелководного арктического шельфа выходило на поверхность, при этом среднегодовая температура была около -17°C . После окончания ледникового периода наступило потепление, ледяные щиты на суше в Северном полушарии растаяли (исключая Гренландию) и уровень моря повысился примерно до современного, затопив мелководный шельф, при этом среднегодовая температура морской воды в рассматриваемом районе составила -1°C [19]. Таким образом, температурные граничные условия сверху повысились примерно на 16 град. [22, 23].

Существует точка зрения, что современные выбросы метана связаны с деградацией подводной мерзлоты вследствие нагрева шельфа и разложением газгидратов в ходе голоценовой трансгрессии, которая началась примерно 10000–12000 лет назад [24, 25]. Восходящий геотермальный поток является другим фактором, влияющим на формирование каналов метановой разгрузки [17, 22]. По мере приближения мерзлоты к тепловому равновесию сверху и снизу ее температура приближается к температуре таяния, составляющей для солесодержащих пород чуть менее 0°C .

Кроме того, следует еще учитывать повышенную температуру в подкорковой мантии и повышенный тепловой поток, идущий из верхней мантии в области восточно-сибирской части шельфа от моря Лаптевых до Берингова пролива [26], по сравнению с западной частью шельфа от Баренцева моря до п-ова Таймыр, где эмиссия пузырькового метана малозначима [18]. Этот долгоиграющий фактор подогрева мерзлых пород снизу также может способствовать их нестабильности и распаду реликтовых газгидратов на шельфе восточной части российской Арктики.

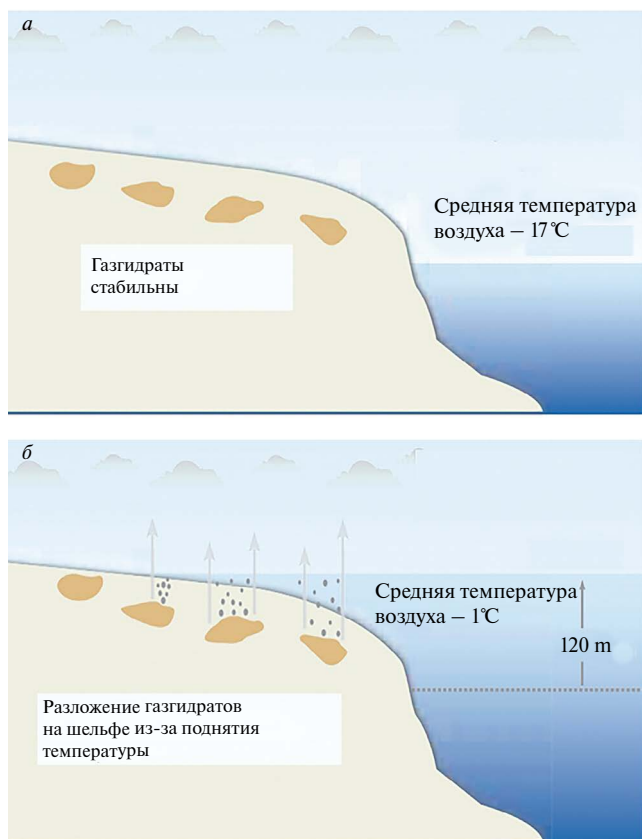


Рис. 6. Влияние изменения уровня моря на стабильность арктических газгидратов: *а* – холодный период, уровень моря понижен, дно мелководного арктического шельфа выходит на поверхность, среднегодовая температура -17°C ; *б* – теплый период, уровень моря повышен, шельф затоплен, среднегодовая температура воды -1°C [17].

Однако при объяснении современной эмиссии метана на арктическом шельфе вследствие разогрева гидратсодержащих пород из-за голоценовой трансгрессии встает вопрос о времени наступления интенсивной фазы эмиссии, приводящей к началу резкого потепления климата примерно в 1980 г. Данный вопрос связан с разными временными масштабами двух процессов: 1) процесса постепенного нагрева осадочных пород шельфа в течение приблизительно 10 тыс. лет вследствие трансгрессии и 2) процесса быстрого развития эмиссии метана в течение нескольких лет, с которой предположительно связано современное потепление климата. Разница в три порядка между характерными временами этих процессов заставляет думать, что должен существовать дополнительный триггерный механизм, быстро запускающий процесс эмиссии метана на фоне уже достаточно прогретых осадочных породах шельфа. Таким триггерным механизмом запуска эмиссии метана на шельфе могут быть вышеупомянутые деформационные волны, приходящие от очагов сильнейших землетрясений в Алеутской и Курило-Камчатской островных дугах.

В рассматриваемом здесь геодинамическом подходе известная концепция деформационных волн, первоначально придуманная для интерпретации процессов миграции сейсмической активности, используется в новом качестве – как возможный триггерный механизм воздействия на газонасыщенные осадочные породы, приводящий к эмиссии метана. Существенная особенность нашей модели деформационных волн состоит в учете 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 [27–29].

При обосновании *сейсмогенно-триггерной гипотезы* потепления климата важное значение имеют прямые измерения концентрации метана в атмосфере, проводимые учеными из США с начала 1980-х годов (NOAA Global Monitoring Laboratory measurements) [30]. На рис. 7, 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 ее роста для четырех временных 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 рис. 7, б показаны ежегодные приращения средней концентрации метана в атмосфере.

Для подтверждения сейсмогенно-триггерной гипотезы резкого потепления климата необходимо прежде всего убедиться в наличии пространственно-временной корреляции между сильнейшими землетрясениями и наблюдаемыми климатическими изменениями. Рассмотрим возможную корреляцию сильных событий и 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 учетом временного 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 рис. 8: две огибающие кривые отражают изменение среднегодовых приращений концентрации метана 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 учетом упоминавшегося временного сдвига). Корреляционное подобие двух кривых, на наш взгляд, свидетельствует в пользу рассматриваемой нами гипотезы потепления климата.

Вместе с тем для некоторых временных интервалов на рис. 8 наблюдаются нарушения корреляции между кривыми изменения сейсмической активности и концентрации метана в атмосфере. К таким интервалам плохой корреляции относятся следующие временные отрезки: 1984–1985 гг., 1995–1998 гг., 2001–2004 гг., 2009–2013 гг., 2017–2021 гг. Такие расхождения между кривыми находят естественное объяснение в рамках рассматриваемого

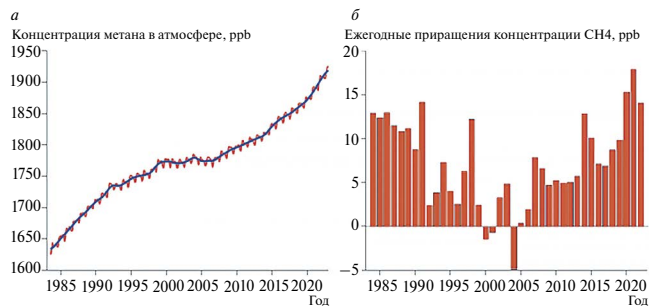


Рис. 7. Средняя концентрация метана в атмосфере: *a* – графики, демонстрирующие глобально осредненное среднемесячное значение метана в атмосфере [30]; *б* – график годовых приращений атмосферного CH_4 на основе глобально усредненных данных о морской поверхности [31].

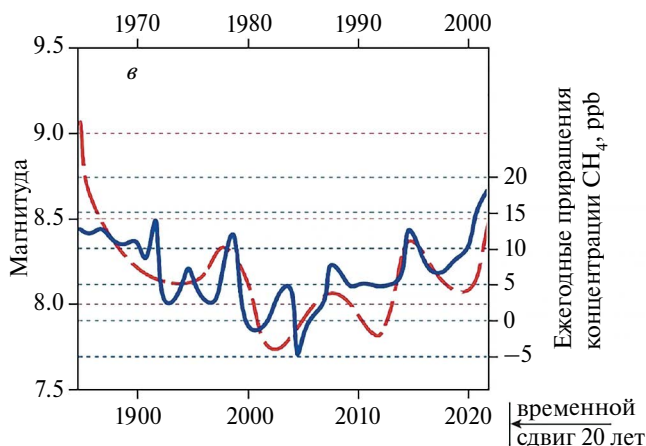


Рис. 8. Сопоставление изменений сейсмической активности Земли и вариаций концентрации метана в атмосфере. Сплошной линией показана огибающая кривая, отражающая изменение среднегодовых приращений концентрации метана в атмосфере в период 1984–2022 гг. Пунктиром дана кривая вариации уровня сейсмической активности Земли, определяемой крупными землетрясениями с магнитудой больше 8 за период 1964–2002 гг. [32].

триггерного механизма эмиссии метана из осадочной толщи в атмосферу. По смыслу этого механизма добавочные напряжения, связанные с деформационными волнами, разрушают микроструктуру пор в мерзлых породах и метастабильных газгидратах, в которых находится метан, и последний начинает фильтроваться через осадочные породы с определенной скоростью, зависящей от проницаемости и других параметров среды. По оценкам из работы [13], характерная скорость фильтрации может составлять порядка 1 м/год. Экспериментально было установлено, что скорость подъема газового (метанового) фронта к поверхности осадков может достигать 5–7 м/год [25]. Отсюда следует, что эмиссия метана будет продолжаться определенное время после запуска процесса триггерным механизмом разрушения геосреды [33, 34]. Это время будет зависеть от глубины и толщины затронутого разрушением газонасыщенного слоя. Например, если затронутый разрушением газонасыщенный слой начнется почти от поверхности и имеет толщину около 150 м, то при скорости вертикальной фильтрации порядка 1 м/год эмиссия метана может продолжаться еще около 150 лет после ее запуска сейсмогенно-триггерным механизмом (рис. 9).

Этим объясняется факт продолжения и даже некоторого усиления эмиссии метана на арктическом шельфе в наши дни, хотя после серии сильнейших землетрясений середины прошлого века, запустивших массивную эмиссию метана около 1979–1980 г., давшую старт современному потеплению климата, сейсмическая активность очень заметно снизилась

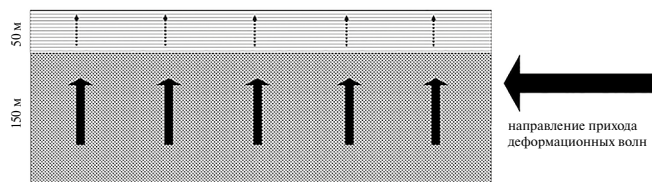


Рис. 9. Вертикальная фильтрация метана, вызванная триггерным эффектом деформационных волн (жирные сплошные стрелки), поднятие пузырьков метана в воде – силы (прерывистые стрелки).

и находилась на сравнительно низком уровне вплоть до настоящего времени. Таким образом, однажды запущенный сейсмогенно-триггерным механизмом процесс эмиссии метана способен продолжаться десятки и даже первые сотни лет без какой-либо внешней подпитки.

Помимо объяснения упомянутого выше нарушения корреляции между концентрацией метана в атмосфере и более ранними периодами сейсмической активности Земли этот вывод имеет важное значение для прогноза периода продолжающегося глобального потепления с точки зрения рассматриваемой здесь сейсмогенно-триггерной концепции изменения климата. По нашей гипотезе получается, что независимо от усилий мирового сообщества по сокращению выбросов CO_2 природная эмиссия метана и связанное с ней потепление климата, возможно, будут продолжаться большую часть XXI в. В пользу такого неутешительного сценария говорит, в частности, развитие средневекового периода потепления (рис. 2), если его интерпретировать в рамках сейсмогенно-триггерной гипотезы, т.е. считать, что возникновение средневекового оптимума связано с серией мегаземлетрясений с магнитудой больше 8,5, произошедших в зонах субдукции в начале X в., аналогичной рассмотренной выше серии сильнейших землетрясений середины XX в. Судя по оценкам повторяемости подобных мегасобытий, такое предположение кажется вполне реалистичным.

Получение прямых оценок периодов повторяемости мегаземлетрясений является крайне сложной задачей в силу того, что период инструментальных наблюдений, как правило, во много раз короче характерного времени накопления упругих напряжений, необходимых для реализации сейсмических событий подобной силы. Приведем конкретные оценки периодов повторяемости мегаземлетрясений для некоторых зон субдукции. Оценки периода повторяемости для мегаземлетрясения с $M \sim 9$ в Японской зоне субдукции по результатам недавних исследований палеоцунами составляют приблизительно 800–1100 лет [35]. По другим оценкам, упругий сейсмогенный потенциал, необходимый для реализации события подобной силы в рассматриваемом регионе, может накопиться за период порядка 350–700 лет [36]. Для субдукционной зоны Каскадия в Тихом океане период повторяемости мегаземлетрясений по палеосейсмологическим и геологическим данным составляет от 215 до 1488 лет, при этом среднее значение периода повторяемости за последние 7700 лет составляет 600 лет [37]. В Суматра-Андаманской зоне субдукции нижняя граница периода повторяемости мегаземлетрясений, подобных землетрясению 2004 г. с $M = 9,2$, оценивается по результатам расчетов в 600 лет [38]. Аналогичные оценки, полученные по палеосейсмологическим и геологическим данным, достигают 960–1200 лет [39]. Перуанско-Чилийская зона субдукции характеризуется более коротким периодом повторяемости мегаземлетрясений, который по оценкам [38] составляет 300–400 лет. В Алеутской зоне субдукции период повторяемости мегаземлетрясений с протяженными очагами, захватывающими сразу несколько смежных сегментов субдукционной зоны, составляет 800–950 лет [40].

Исходя из приведенных оценок можно предположить, что начало периода средневекового потепления, так же, как и в современной ситуации, связано с возникновением в X в. серии сильнейших мегаземлетрясений с магнитудами больше 8,5 в Алеутской и Курило-Камчатской островных дугах и действием того же сейсмогенно-триггерного механизма эмиссии метана и потепления климата. Интересно отметить, что на примере эволюции средневекового оптимума видно, что быстрый рост температуры продолжался несколько сотен лет, после чего температура стала понижаться, перейдя затем в малый ледниковый период в XIV–XVIII вв. (рис. 2). Не исключено, что такой же неутешительный климатический сценарий будет реализован и в грядущие века

современного исторического периода. Поэтому человечеству следует уделять большее внимание вопросам адаптации к длительному периоду потепления климата, чем пытаться остановить природный процесс глобального потепления путем уменьшения выбросов углекислого газа, сокращая и в перспективе ликвидируя основные отрасли добывающей промышленности.

Заключение

В работе дается критический анализ доминирующей сегодня в мире антропогенной концепции глобального потепления климата. Показано серьезное несоответствие между наблюдаемыми и ожидаемыми (по антропогенной концепции) вариациями хода изменения температуры и объемов выбросов углекислого газа в XX в. Предложенная альтернативная сейсмогенно-триггерная концепция потепления климата объясняет наблюдаемые климатические изменения и их связь с сильнейшими землетрясениями, генерирующими деформационные волны, которые за счет триггерного воздействия на газонасыщенные осадочные слои приводят к усилению эмиссии метана и неантропогенному парниковому эффекту. Если применить аналогию между современным изменением климата в XX и XXI вв. и наиболее близким по времени средневековым оптимумом, то, исходя из хода кривой потепления климата в средние века и сейсмогенно-триггерной концепции потепления, можно с определенной осторожностью и без экологического алармизма высказать предположение о достаточно длительном периоде продолжающейся фазы современного потепления климата по крайней мере на протяжении более 100 лет, т.е. заведомо до конца нынешнего столетия. Такой пессимистический сценарий эволюции климата должен уточняться и тщательно обосновываться в будущих исследованиях. В практическом плане он ставит в приоритет прежде всего разработку различных мер адаптации к возможным природным явлениям катастрофического характера, связанным с климатическими изменениями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов-Данильян В. И., Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Ситуация в России // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 11. С. 1032–1046.
2. Neukom R., Barboza L. A., Erb M. P., Shi Feng, Emile-geay J., Evans M. N. et al. Global mean temperature reconstructions over the Common Era. figshare. Collection. 2019. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4507043.v2>
3. AGES2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. Scientific Data 4. 2017. 170088 EP. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.88>.
4. PAGES2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era // Nat. Geosci. 2019. Vol. 12. P. 643–649. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0400-0>
5. IPCC Scientific Assessment 1990: Climate Change 1990 / eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums. Cambridge, Great Britain; New York, NY, USA; Melbourne, Australia: Cambridge University Press, 1990. 410 p.
6. IPCC, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. R. T. Watson, and the Core Writing Team. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 398 p.
7. Moberg A., Sonechkin D., Holmgren K. et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data // Nature. 2005. Vol. 433. P. 613–617. <https://doi.org/10.1038/nature03265>.
8. Lamb H. H. The early medieval warm epoch and its sequel // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 1965. Vol. 1. P. 13–37.

9. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries // *Nature*. 1998. Vol. 392. P. 779–787.
10. Masson-Delmotte V., Schulz M., Abe-Ouchi A., Beer J., Ganopolski A., González Rouco J.F., Jansen E., Lambeck K., Luterbacher J., Naish T., Osborn T., Otto-Bliesner B., Quinn T., Ramesh R., Rojas M., Shao X., Timmermann A. Information from Paleoclimate Archives. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
11. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2022 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2022. Vol. 14. P. 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
12. Lobkovsky L.I. Seismogenic-triggering mechanism of gas emission activations on the Arctic shelf and associated phases of abrupt warming // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 428.
13. 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. Vol. 12. P. 372.
14. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Garagash I.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A., Semiletov I.P. Large Earthquakes in Subduction Zones around the Polar Regions as a Possible Reason for Rapid Climate Warming in the Arctic and Glacier Collapse in West Antarctica // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. P. 171.
15. *Climate at a Glance: Global Time Series*// NOAA National Centers for Environmental information. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/cag/> (дата обращения: 15.09.2022).
16. Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 409. P. 133–146.
17. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks // *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications* / eds. Martin Sommerkorn, Susan Joy Hassol. Published by WWF International Arctic Programme August, 2009. P. 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1.
18. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. Vol. 327, N5970. P. 1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221.
19. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernikh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nat. Geosci.* 2014. Vol. 7, N1. P. 64–70. DOI: 10.1038/ngeo2007, 2014.
20. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernikh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015. Vol. 373. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
21. Chernikh D., Shakhova N., Yusupov V., Gershelis E., Morgunov B., Semiletov I. First Calibrated Methane Bubble Wintertime Observations in the Siberian Arctic Seas: Selected Results from the Fast Ice // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. 228. <https://doi.org/10.3390/geosciences13080228>.
22. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. 251. DOI: 10.3390/geosciences9060251.
23. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Shakhova N.E., Semiletov I.P. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. F03028. DOI: 10.1029/2012JF002358, 2012.
24. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // *Geo-Mar. Lett.* 2005. Vol. 25. P. 167–182.
25. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk K. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. 15872.
26. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Арктического региона // *Доклады Российской академии наук*. 2024. DOI: 10.1134/S1028334X23603000.

27. 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.
28. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. Термомеханические волны в системе упругая литосфера – вязкая астеносфера // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 6. С. 4–18.
29. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Габсагаров Ю.В., Алексеев Д.А. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм эмиссии метана, разрушения ледников и потепления климата в Арктике и Антарктике // Физика Земли. 2023. № 3. С. 33–47.
30. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2015. Version 2023-02. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
31. Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M., Masarie K.A. The growth rate and distribution of atmospheric methane // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 17021–17043. <https://doi.org/10.1029/94JD01245>.
32. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 6. С. 526–538.
33. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. К теории фильтрации с двойной пористостью // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2019. Т. 484, № 3. С. 348–351.
34. 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.
35. Minoura K., Imamura F., Sugawara D., Kono Y., Iwashita T. The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunamis on the Pacific coast of northeastern Japan // J. Nat. Disaster Sci. 2001. Vol. 23, N2. P. 83–88.
36. Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake // Nature. 2011. Vol. 475. P. 373–377.
37. McCaffrey R. Global frequency of magnitude 9 earthquakes // Geology. 2008. Vol. 36, N3. P. 263–266.
38. Satake K., Atwater B.F. Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2007. Vol. 35. P. 349–374.
39. Rajendran K. On the recurrence of great subduction zone earthquakes // Current Science. Special section: Earth Sciences. 2013. Vol. 104, N7. P. 880–892.
40. Shennan I., Barlow N., Carver G., Davies F., Garrett E., Hocking E. Great tsunamigenic earthquakes during the last 1000 years on the Alaska megathrust // Geology. 2014. Vol. 42, N8. P. 687–690.

REFERENCES

1. Danilov-Danilyan V.I., Kattsov V.M., Porfiryev B.N. Ecology and climate: where we are now and where we will be in two or three decades. The situation in Russia. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(11):1032–1046. (In Russ.).
2. Neukom R., Barboza L.A., Erb M.P., Shi Feng, Emile-geay J., Evans M.N. et al. 2019. Global mean temperature reconstructions over the Common Era. figshare. Collection. 4507043.v2. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare>.
3. AGES2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. *Scientific Data* 4. 2017. 170088 EP. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.88>.
4. PAGES2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat. Geosci.* 2019;12:643–649. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0400-0>.
5. Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (eds.). IPCC Scientific Assessment 1990: Climate Change 1990. Cambridge, Great Britain; New York, NY, USA; Melbourne, Australia: Cambridge University Press; 1990. 410 p.
6. Watson R.T. and the Core Writing Team (eds.). IPCC, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2001. 398 p.

7. Moberg A., Sonechkin D., Holmgren K. et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*. 2005;433:613–617. <https://doi.org/10.1038/nature03265>.
8. Lamb H.H. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1965;1:13–37.
9. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries. *Nature*. 1998;392:779–787.
10. Masson-Delmotte V., Schulz M., Abe-Ouchi A., Beer J., Ganopolski A., González Rouco J.F., Jansen E., Lambeck K., Luterbacher J., Naish T., Osborn T., Otto-Bliesner B., Quinn T., Ramesh R., Rojas M., Shao X., Timmermann A. Information from Paleoclimate Archives. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2013. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press.
11. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data*. 2022;14:4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
12. Lobkovsky L.I. Seismogenic-triggering mechanism of gas emission activations on the Arctic shelf and associated phases of abrupt warming. *Geosciences*. 2020;10:428.
13. 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;12:372.
14. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Garagash I.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A., Semiletov I.P. Large Earthquakes in Subduction Zones around the Polar Regions as a Possible Reason for Rapid Climate Warming in the Arctic and Glacier Collapse in West Antarctica. *Geosciences*. 2023;13:171.
15. Climate at a Glance: Global Time Series. *NOAA National Centers for Environmental Information*. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/cag/> (date of application: 15.09.2022).
16. Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015;409:133–146.
17. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks. In: Martin Sommerkorn, Susan Joy Hassol (eds.). *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications*. Published by WWF International Arctic Programme August, 2009. P. 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1.
18. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*. 2010;327(5970):1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221.
19. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernikh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nat. Geosci.* 2014;7(1):64–70. DOI: 10.1038/ngeo2007, 2014.
20. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Pantelev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson Ö. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015;373. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
21. Chernykh D., Shakhova N., Yusupov V., Gershelis E., Morgunov B., Semiletov I. First Calibrated Methane Bubble Wintertime Observations in the Siberian Arctic Seas: Selected Results from the Fast Ice. *Geosciences*. 2023;13. 228. <https://doi.org/10.3390/geosciences13080228>.
22. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*. 2019;9:251. DOI: 10.3390/geosciences9060251.
23. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Shakhova N.E., Semiletov I.P. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region. *J. Geophys. Res.* 2012;117. F03028. DOI: 10.1029/2012JF002358, 2012.
24. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrillov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas. *Geo-Mar. Lett.* 2005;25:167–182.
25. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk K. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nat. Commun.* 2017;8. 15872.

26. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Bobrov A.M., Chuvaev A.V. Global geodynamic model of the modern Earth and its application for the Arctic region. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2024. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1028334X23603000.
27. Garagash I.A., Lobkovsky L.I. Deformation tectonic waves as a possible trigger mechanism for intensifying methane emissions in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economics*. 2021;1(1):42–50. (In Russ.).
28. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. Thermomechanical waves in the system elastic lithosphere–viscous asthenosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Liquid and Gas*. 2021;(6):4–18. (In Russ.).
29. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Vladimirova I.S., Gabsatarov Yu. V., Alekseev D.A. Possible seismogenic trigger mechanism for methane emission, glacier destruction and climate warming in the Arctic and Antarctic. *Physics of the Earth*. 2023;(3):33–47.
30. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2015. Version 2023-02. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
31. Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M., Masarie K.A. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *J. Geophys. Res.* 1994;99:17021–17043. <https://doi.org/10.1029/94JD01245>.
32. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Vladimirova I.S., Alekseev D.A. Strong earthquakes and deformation waves as possible triggers of climate warming in the Arctic and destruction of glaciers in the Antarctic. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(6):526–538. (In Russ.).
33. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. On the theory of filtration with double porosity. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences*. 2019;484(3):348–351. (In Russ.).
34. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. Generalized model of filtration in a fractured-porous medium with low-permeability inclusions and its possible applications. *Physics of the Earth*. 2022;(2):144–154. (In Russ.).
35. Minoura K., Imamura F., Sugawara D., Kono Y., Iwashita T. The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunamis on the Pacific coast of northeastern Japan. *J. Nat. Disaster Sci.* 2001;23(2):83–88.
36. Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*. 2011;475:373–377.
37. McCaffrey R. Global frequency of magnitude 9 earthquakes. *Geology*. 2008;36(3):263–266.
38. Satake K., Atwater B.F. Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2007;35:349–374.
39. Rajendran K. On the recurrence of great subduction zone earthquakes. *Current Science. Special section: Earth Sciences*. 2013;104(7):880–892.
40. Shennan I., Barlow N., Carver G., Davies F., Garrett E., Hocking E. Great tsunamigenic earthquakes during the last 1000 years on the Alaska megathrust. *Geology*. 2014;42(8):687–690.