

## ВОЗМОЖНЫЙ СЕЙСМОГЕННО-ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕЗКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ЭМИССИИ МЕТАНА И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Л. И. Лобковский

ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 июня 2020 г.

*Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм возникновения фаз резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике как следствие сильных механических возмущений краевой области арктической литосферы, вызванных сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции, передачи этих возмущений в область арктического шельфа и прилегающей суши и триггерного эффекта высвобождения метана из многолетнемерзлых осадочных пород и метастабильных газогидратов с последующими выбросами парникового газа в атмосферу.*

**Ключевые слова:** активизация эмиссии метана, резкое потепление климата, Арктика, сильнейшие землетрясения, Алеутская зона субдукции, тектонические волны, триггерный механизм, метастабильные газогидраты, многолетнемерзлые породы, фильтрация газа.

### Введение

Проблема глобального потепления климата на Земле в последнее время выдвинулась на передний план среди общих проблем цивилизации, поскольку, по мнению большинства специалистов, занимающихся вопросами ее устойчивого развития, дальнейшее потепление климата с наблюдаемым в последние 40 лет ускоренным трендом повышения температуры ставит вопрос о выживаемости человечества и возможности его адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды, вызванным таким потеплением. Относительно причин глобального потепления климата существует громадная литература, причем число публикаций по этой теме в последнее время нарастает в геометрической прогрессии. Основной версией объяснения данного феномена считается антропогенный фактор возникновения парникового эффекта, обусловленного повышенными выбросами углекислого

газа в атмосферу вследствие ускоренного развития мировой индустрии, в частности нефтегазовой отрасли.

Существует довольно много работ, в которых предлагаются математические модели, показывающие влияние выбросов углекислого газа на потепление климата. Однако, как правило, остается за кадром очень серьезный и интригующий вопрос: какова причина на первый взгляд совершенно внезапного наступления фаз резкого потепления климата на Земле, особенно в арктическом регионе?

На рис. 1 показана известная кривая изменения температуры для Арктики в XX и XXI вв., на которой ясно видны две фазы достаточно резкого подъема усредненной температуры на фоне ее межгодовых колебаний: первая фаза заметного подъема приходится на двадцатилетний период 1920—1940 гг., а вторая фаза потепления длится уже 40 лет, начавшись примерно в 1980 г., и продолжается в наши дни. С позиций промышленно-антропогенной теории потепления климата, вообще говоря, необходимо по-

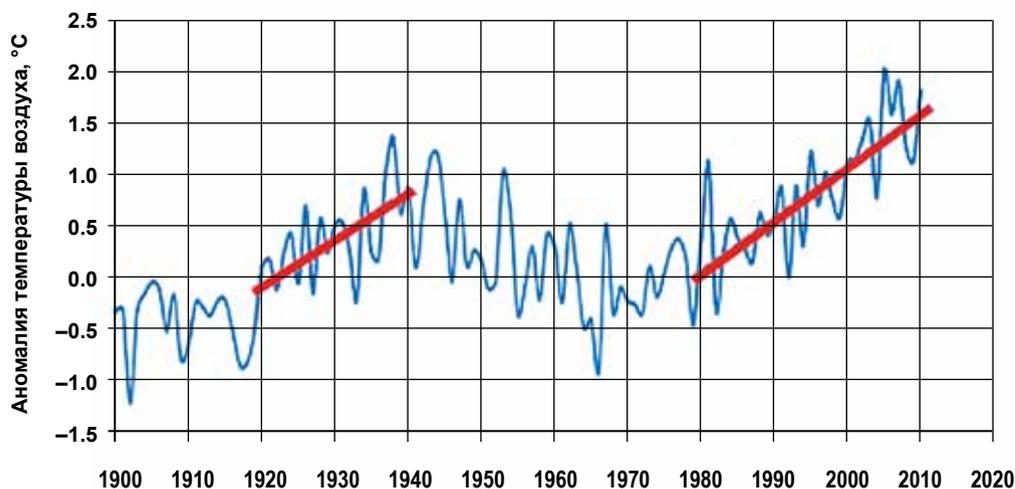


Рис. 1. Изменения температуры воздуха в Арктике с начала XX в. (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт). Красными жирными линиями показаны фазы потепления

Fig. 1. Changes in air temperature in the Arctic since the beginning of the 20th century (Arctic and Antarctic Research Institute). The red thick lines show the warming phases

казать, что именно в отмеченные периоды резкого потепления климата выбросы углекислого газа в атмосферу заметно возрастали за счет существенно-го роста интенсивности производства соответствующих отраслей промышленности. Так ли это было на самом деле? Автору, к сожалению, не известны опубликованные материалы по этому вопросу.

Наряду с широко распространенной антропогенной теорией современного потепления глобального климата рассматриваются возможности влияния на современный климат Земли и природных факторов. В частности, для Арктики, испытывающей самое интенсивное современное потепление, большое значение придается выбросам метана, которые, как предполагает ряд исследователей [1—6], могут быть вызваны процессами таяния мерзлоты и деградации реликтовых газогидратов, в результате чего освобождаются большие объемы метана, обладающего сильным парниковым эффектом. При этом причиной таяния мерзлоты и деградации газогидратов считается фоновое повышение температуры поверхности Земли за счет различных возможных факторов, например в результате голоценовой трансгрессии Северного Ледовитого океана на шельф [3; 4] и т. д. Не вдаваясь здесь в обсуждение и анализ разных тепловых моделей, показывающих возможности нагрева поверхностного слоя Земли, зададимся одним принципиальным вопросом: какова вероятность того, что медленный природный процесс нагрева значительной площади поверхности Земли (включая арктический шельф и примыкающие участки суши), который характеризуются большими временными масштабами в десятки и сотни тысяч лет, именно в наше время достиг критической точки начала повсеместного таяния мерзлоты и разрушения газогидратов, вызвавших интенсивные выбросы метана,

приведшие, как полагают, в силу парникового эффекта к современным резким фазам потепления климата в Арктике? Вероятность реализации такой цепи событий представляется чрезвычайно низкой. Отсюда — необходимость поиска и анализа других, альтернативных по отношению к чисто тепловым, физических механизмов быстрого потепления климата в Арктике. Один из таких возможных механизмов, впервые предложенный автором на заседании Президиума РАН 10 марта 2020 г. [7], излагается в настоящей работе.

#### **Сильнейшие землетрясения в Алеутской зоне субдукции, тектонические волны и триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике**

Очевидно, что рассматриваемые природные механизмы, гипотетически способные вызвать внезапные фазы резкого потепления климата в арктическом регионе, должны отвечать двум основным критериям: они должны иметь резкий скачкообразный характер проявления, а также обладать достаточно большой мощностью и крупномасштабным (региональным) воздействием. Под эти критерии в принципе подходят, например, весьма изменчивые океанские (атлантические) течения или стоки великих сибирских рек в Северный Ледовитый океан и т. д. В этих случаях, однако, необходимо установить причину резких изменений режимов рассматриваемых процессов, показать их приуроченность к фазам резкого потепления климата в Арктике и объяснить конкретный механизм, приводящий к такому потеплению.

Если обратиться к эндогенным геодинамическим процессам в недрах Земли, отвечающим вышеуказанным критериям, то наиболее очевидным кандидатом

на эту роль представляются сильнеешие мегаземлетрясения, происходящие в зонах субдукции, которые характеризуются, во-первых, огромной энергией, во-вторых, крупномасштабным региональным воздействием на окружающие области литосферы. Самой близкой к арктическому региону зоной субдукции является Алеутская островная дуга, обрамляющая его с юго-востока, где происходит процесс погружения в мантию северо-западной части Тихоокеанской литосферной плиты, который во многом определяет геологическую эволюцию Арктики [8; 9].

Алеутская дуга находится на расстоянии нескольких тысяч километров от арктического шельфа, и в этой связи возникают три основных вопроса, ответы на которые должны быть даны в рамках предлагаемого сейсмогенного механизма резкой активизации эмиссии метана и соответствующего потепления климата в арктическом регионе. Первый вопрос касается корреляции между фазами быстрого потепления климата и периодами возникновения сильнееших землетрясений в Алеутской зоне субдукции. Второй вопрос связан с механизмом передачи возмущений в литосфере, обусловленных сильнеешими землетрясениями, от Алеутской островной дуги в область арктического шельфа. Наконец, третий вопрос заключается в самом механизме воздействия сейсмогенного возмущения на газонасыщенные мерзлые породы и газогидраты арктического шельфа, приводящего к освобождению метана и его выбросам в атмосферу.

Рассмотрим последовательно указанные три вопроса. Первый из них (существует ли корреляция между фазами резкого потепления климата в Арктике и периодами наибольшей сейсмической активности в Алеутской островной дуге) предполагает в первую очередь обратиться к историческим сведениям о наиболее крупных сильнееших землетрясениях с магнитудой больше 8, произошедших в пределах Алеутской дуги с начала XX в. до наших дней. На рис. 2 и 3, подготовленных И. С. Владимировой, представлены исторические данные по самым крупным сильнеешим землетрясениям с магнитудой, равной или больше 8, для всей Земли за период с 1891 г. по настоящее время в виде набора карт эпицентров этих событий с временной разбивкой по 10 лет.

Выделяя на этих картах Алеутскую зону субдукции, можно видеть беспрецедентно мощную серию из трех сильнееших катастрофических землетрясений, произошедших за короткий промежуток времени с 1957 по 1965 гг.: это сильнеешее землетрясение 1957 г. в центральной части дуги с магнитудой  $M = 8,6$ , сильнеешее землетрясение 1964 г. на восточном конце дуги с предельной магнитудой  $M = 9,3$  (Аляскинское землетрясение) и, наконец, сильнеешее землетрясение 1965 г. в западной части дуги с магнитудой  $M = 8,7$ .

После этих событий Алеутская островная дуга находилась в условиях относительной сейсмической

«тишины» в смысле отсутствия сильнееших землетрясений с магнитудой порядка 8 вплоть до наших дней за исключением одного события с  $M = 8,0$ , произошедшего в центральной части дуги в 1986 г. Получается, что между ударной серией из трех сильнееших мегаземлетрясений, произошедших в Алеутской островной дуге, и стартом резкого потепления климата в Арктике в 1980 г. прошло 15—20 лет. Это означает, что в рамках предполагаемого сейсмогенного механизма воздействия на климат в Арктике возмущения в литосфере, вызванные сильнеешими землетрясениями в Алеутской дуге, должны пройти расстояние более 2000 км до восточной части арктического шельфа примерно за 20 лет, т. е. средняя скорость распространения такого рода возмущений в литосфере должна быть порядка 100 км/год.

Перейдем ко второму вопросу — о механизме медленной передачи литосферных возмущений с указанной выше скоростью. Здесь следует подчеркнуть, что в отличие от упругих сейсмических волн, быстро распространяющихся в литосфере со скоростью около 8 км/с, в нашем случае рассматриваются принципиально другие так называемые тектонические или деформационные волны в литосфере, которые характеризуются крупномасштабными возмущениями литосферы как цельной упругой плиты, подстилаемой высоковязким астеносферным слоем. Впервые задачу о возможности медленного распространения деформаций в литосфере, рассматриваемой как квазиоднородный упругий слой, лежащий на вязком основании, рассмотрел В. Эльзассер в 1967 г. [10]. Он показал, что в простейшем случае горизонтальных деформаций в литосферном слое возмущение, вызванное скачкообразным начальным смещением, описывается простым уравнением диффузии. В последующих работах, в частности в статье Дж. Мелоша [11], было показано, что тектоническая диффузия напряжений в литосфере по Эльзассеру может объяснить миграцию сейсмической активности после сильнееших землетрясений, например миграцию афтершоков после землетрясения в Алеутской дуге 1965 г. ( $M = 8,7$ ) на расстояние около 300 км по Тихоокеанской плите со средней скоростью порядка 100 км/год. Таким образом, можно констатировать, что в принципе существует механизм медленной передачи возмущений деформаций и напряжений по литосферному слою со скоростью около 100 км/год, хотя сами возмущения сильно затухают и замедляются по мере удаления от источника возмущения в соответствии с диффузионным механизмом Эльзассера, описывающим распространение чисто горизонтальных смещений в системе литосфера-астеносфера. Значительно меньшее затухание возмущений и большее расстояние их распространения в литосфере получается, если использовать колебательную модель И. А. Гарагаша [12] для системы литосфера-астеносфера с учетом фазового перехода на подошве литосферы. Обобщение этой модели на случай упру-

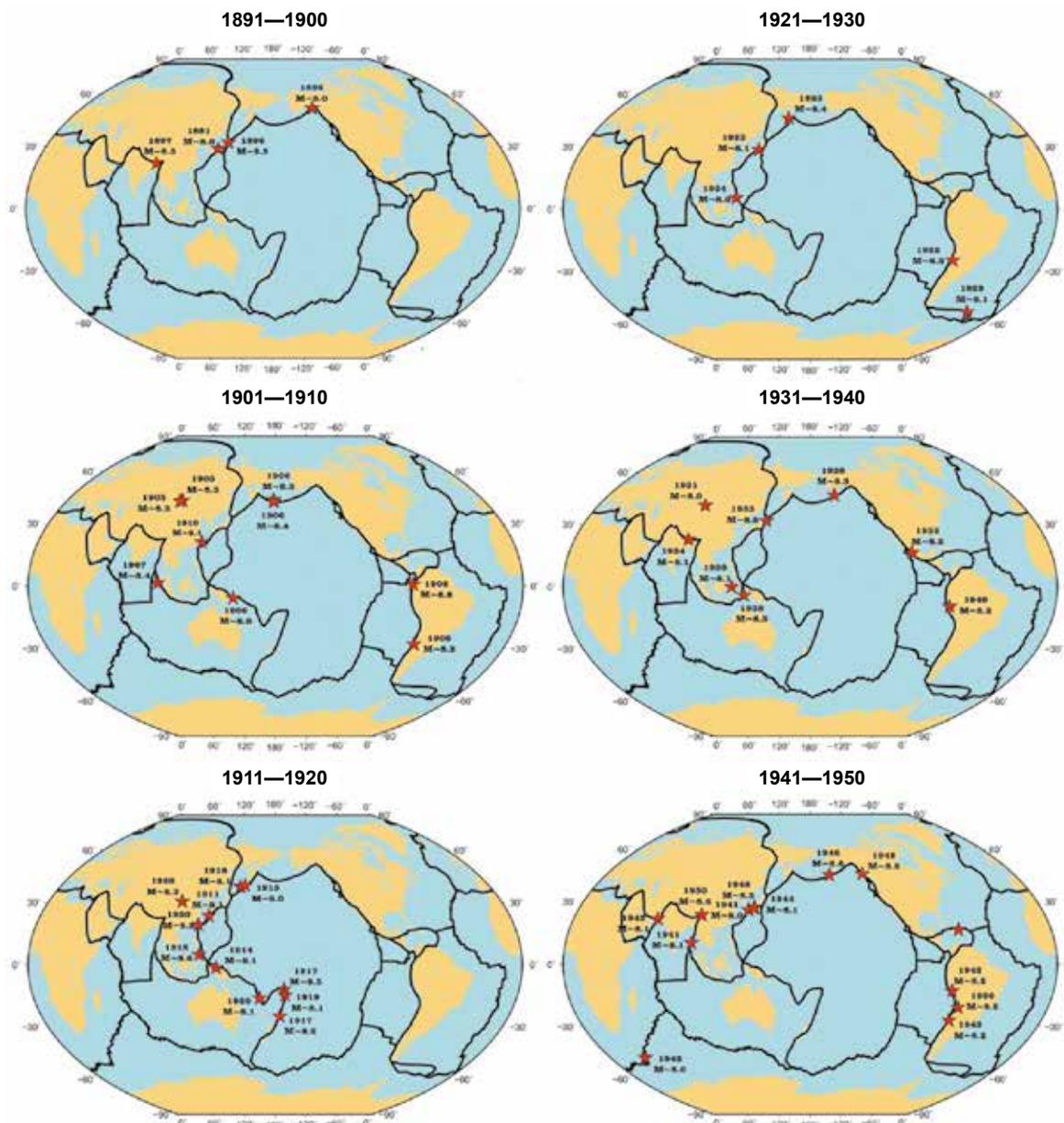


Рис. 2. Эпицентры сильнейших землетрясений в период с 1891 по 1950 гг. Черными линиями показаны границы плит по модели NUVEL-1, красными звездочками — эпицентры землетрясений с  $M \geq 8,0$   
 Fig. 2. Global distribution of epicenters of the strongest earthquakes in 1891 – 1950. Black lines show the plate boundaries according to the NUVEL-1 model, red asterisks indicate the epicenters of earthquakes with  $M \geq 8,0$

го-изгибных деформаций литосферы, включающих наряду с горизонтальными вертикальные смещения, позволяет, по оценкам ее автора, описать волновой режим дальнего распространения возмущений со скоростью порядка 100 км/год при небольшом их затухании (рис. 4).

Рассмотрим третий из указанных выше вопросов, касающихся гипотезы сейсмогенно-триггерного механизма активизации эмиссии метана в Арктике. Речь пойдет о возможном триггерном эффекте возмущений напряженно-деформированного состояния литосферы арктического шельфа и приле-

гающих областей суши, вызванных мегаземлетрясениями в Алеутской зоне субдукции. Этот эффект может приводить к резкому усилению выбросов метана из газонасыщенных многолетнемерзлых пород и ледовых образований, а также из метастабильных газогидратов, широко представленных в верхних этажах осадочного слоя арктического региона.

Следуя работе Г. Баренблатта и др. [13], будем исходить из обобщенной модели многолетнемерзлого гидратсодержащего пласта, включающего следующие четыре компоненты: (1) несущая матри-

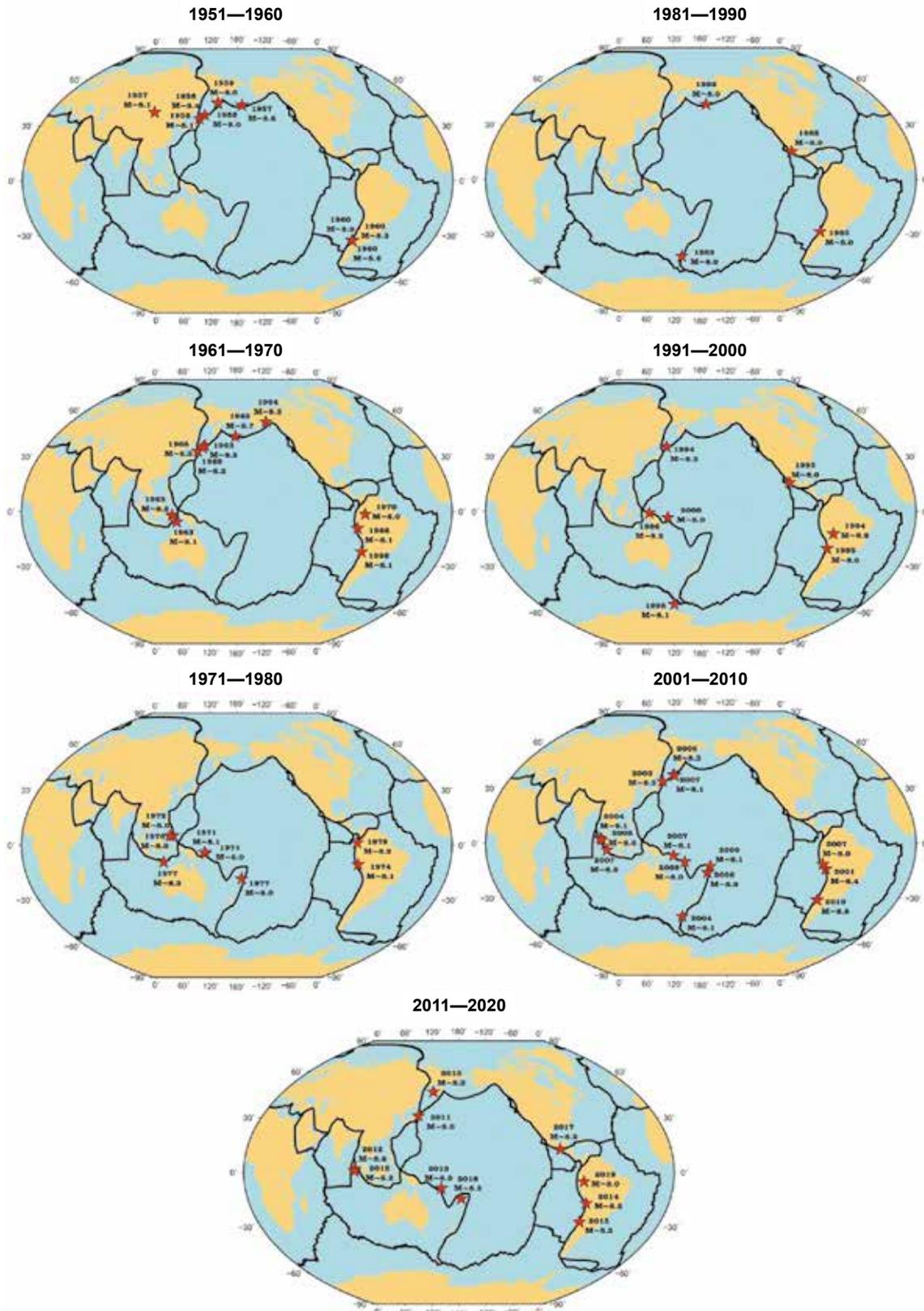


Рис. 3. Эпицентры сильнейших землетрясений в период с 1951 по 2020 гг. Черными линиями показаны границы плит по модели NUVEL-1, красными звездочками – эпицентры землетрясений с  $M \geq 8,0$

Fig. 3. Global distribution of epicenters of the strongest earthquakes in 1951-2020. Black lines show the plate boundaries according to the NUVEL-1 model, red asterisks indicate the epicenters of earthquakes with  $M \geq 8,0$

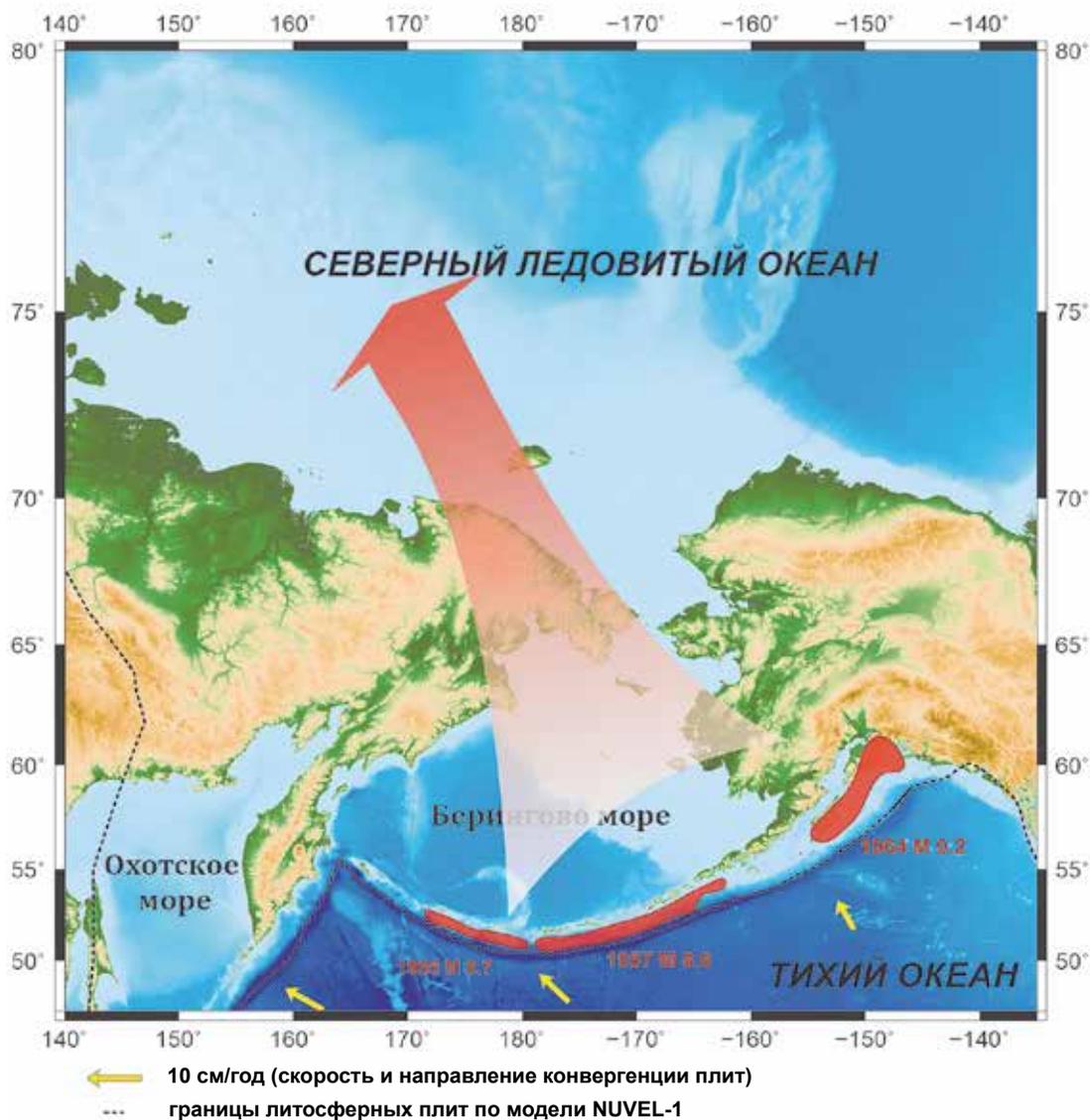


Рис. 4. Очаги сильнейших землетрясений в Алеутской зоне субдукции во второй половине XX в. и направление распространения тектонического возмущения в Арктику. Красные области соответствуют очаговым зонам  
 Fig. 4. The sources of the strongest earthquakes in the Aleutian subduction zone in the second half of the 20<sup>th</sup> century and the propagation direction of tectonic disturbances in the Arctic. Source regions are colored in red

ца — обычная осадочная порода, характеризующаяся «нормальной» проницаемостью и пористостью, в которой имеются низкопроницаемые включения, состоящие из (2) блоков льда, (3) метастабильных газогидратов и (4) микроканалов и микропор, содержащих свободный газ и имеющих существенно надмолекулярные размеры (рис. 4). Предполагается, что в начальном состоянии системы внутреннее давление в микроканалах и микропорах такое же, как и в окружающей матрице, и газ в них остается запертым. Когда в окружающей матрице давление снижается, на границах включений создается большой градиент давления из-за очень малых размеров микропор, хотя разность давлений в породе и включениях может быть мала. Градиент

давления из-за конечной прочности микроканалов и пор приводит к разрушению поверхностного слоя включений, создавая в них пограничный слой, имеющий повышенную проницаемость. Через этот слой происходит истечение газа из включений в проницаемую матрицу, так что область пониженного давления перемещается вглубь включения [13] (рис. 5).

Предлагаемая модель микроструктуры включений согласуется с результатами экспериментальных исследований образцов агломерата, состоящего из газогидратов и блоков газонасыщенного льда, выполненных на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ [14; 15]. В ходе микроструктурных исследований были обнаружены следующие физические свойства образцов агломерата «лед-

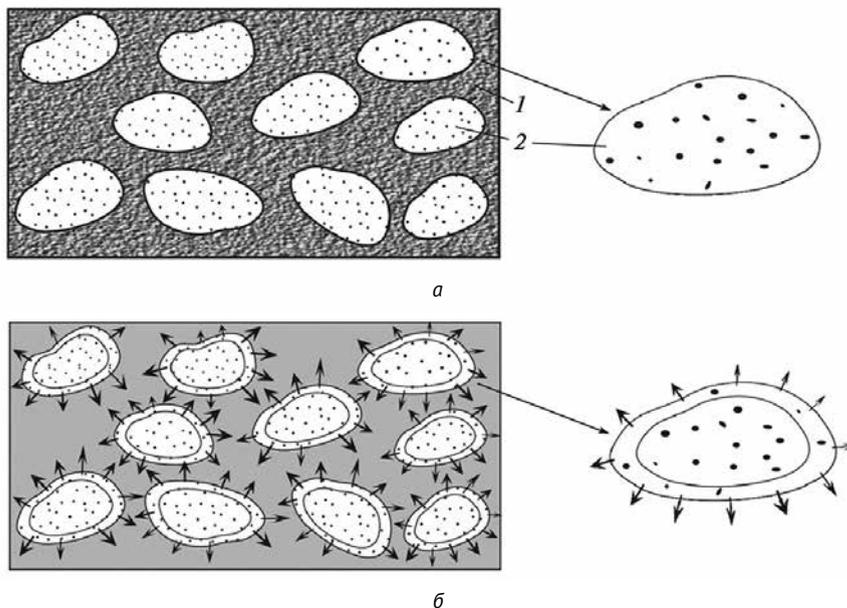


Рис. 5. Структура среды, состоящей из пористой минеральной матрицы с включениями газонасыщенного льда и газогидратов до начала движения, вызванного внешним воздействием (а): 1 – матрица, 2 – включения; истечение газа из включений в пористую среду под воздействием изменения внешнего давления (б)

Fig. 5. The structure of the medium, consisting of a porous mineral matrix with inclusions of gas-saturated ice and gas hydrates before the start of movement caused by external influence (a): 1 – matrix, 2 – inclusions; gas outflow from inclusions into a porous medium under the influence of changes in external pressure (b)

газогидрат»: образцы были представлены массой кристаллов льда, содержащих вытянутые микроканалы диаметром 0,001—0,003 мм, выделяющие значительные количества газа при оттаивании; пузырьки газа появлялись в теле образца на начальной стадии оттаивания, приводя к расширению микроканалов и их проникновению в не затронутую оттаиванием часть образца. При интенсивном оттаивании пузырьки заполняли весь объем образца без видимого нарушения его формы, т. е. микроканалы быстро проникали внутрь тела образца.

Наблюдавшийся в этих опытах процесс разрушения микроканалов, сопровождающийся интенсивным выделением газа, подсказывает физический механизм деградации агломерата «лед-газогидрат» за счет образования связанной системы микропор и микротрещин, заполненных газом, в результате действия значительного градиента давления. Механизм зонального разрушения микроструктуры агломерата «лед-газогидрат-газонаполненные микроканалы» может также объяснить процесс расконсервации метастабильных газогидратов, существующих при отрицательных температурах благодаря возникновению тонкой непроницаемой ледовой оболочки, приводящей к самоконсервации газогидратов [14; 15].

Описанный механизм зонального разрушения микроструктуры многолетнемерзлых газонасыщенных пород, содержащих лед и метастабильные газогидраты, под действием незначительного изменения внешнего давления приводит к заключению, что

даже небольшие региональные изменения напряженно-деформированного состояния литосферы и ее осадочного слоя могут вызвать освобождение достаточно больших объемов запертого в нем газа, его фильтрацию через среду с двойной пористостью (несущая порода с включениями) [16] и последующие выбросы в водную толщу и атмосферу.

В этом и состоит в конечном счете предлагаемый нами физический механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике как следствие сильного механического возмущения краевой области арктической литосферы, вызванного сильнейшими землетрясениями в Алеутской зоне субдукции, передачи этого возмущения в область арктического шельфа и прилегающей суши, а также триггерного эффекта высвобождения метана из многолетнемерзлых ледово-осадочных пород и метастабильных газогидратов. Исходя из представленной концепции, логично сделать ретроспективный прогноз о том, что непосредственно перед началом резкого потепления климата в Арктике в 1980 г. на арктическом шельфе и прилегающих участках суши должны были резко активизироваться выбросы метана в атмосферу, которые, возможно, удастся установить по архивным данным. Проверка данного ретроспективного прогноза необходима для подтверждения изложенной здесь гипотезы.

Еще один вопрос, который встает в связи с сейсмогенно-триггерной гипотезой, относится к более ранней фазе резкого потепления климата в Арктике, которая началась в 1920 г. и завершилась около

1940 г. (см. рис. 1). Время наступления этой фазы, также как в описанном выше случае, коррелирует с более ранней серией сильнейших землетрясений в Алеутской дуге примерно с тем же временным лагом. Действительно, в соответствии с историческими данными по сильнейшим землетрясениям (см. рис. 2) в Алеутской островной дуге в 1899 г. произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой  $M = 8,0$ , а в 1906 г. в западной части Алеутской дуги произошли сразу два сильнейших землетрясения с магнитудами  $M = 8,3$  и  $M = 8,4$ . Затем более 20 лет в этой зоне субдукции было затишье по сильнейшим землетрясениям с магнитудой больше 8,0. Таким образом, время между более ранней ударной серией из трех сильнейших землетрясений в Алеутской дуге (1899 г. —  $M = 8,0$ , 1906 г. —  $M = 8,3$  и  $M = 8,4$ ) и началом первой фазы резкого потепления в 1920 г. составляет около 20 лет, что соответствует временному лагу между рассмотренной выше ударной серией из трех сильнейших землетрясений середины XX в. (в 1957, 1964 и 1965 гг.) и началом второй фазы резкого потепления климата в 1980 г. Таким образом, обеим фазам резкого потепления климата в Арктике в 1920 и 1980 гг. предшествовали ударные серии из трех сильнейших землетрясений в Алеутской зоне субдукции, произошедшие раньше этих климатических событий на 20 лет. Предполагается, что тектонические деформационные волны в литосфере, достигая за время порядка 20 лет восточной части арктического шельфа, продолжали продвигаться дальше на запад и в течение еще 20—30 лет проходили весь арктический шельф, вызывая на своем пути возмущения напряжений в литосфере, генерирующие эмиссионные потоки метана из реликтовых газогидратов и газонасыщенных ледовых образований. Не исключено, что с периодом прохождения «эмиссионных» тектонических волн по арктическому шельфу и примыкающим участкам суши связана продолжительность фаз резкого потепления климата в Арктике.

### Заключение

Изложенный здесь сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике представляет собой новый взгляд на проблему, который, безусловно, должен быть подвергнут всесторонней проверке и анализу как с точки зрения фактических данных, так и в плане детальной проработки физико-математических основ развиваемой новой концепции. Автор далек от мысли, что наблюдаемое потепление климата в Арктике и тем более глобальное потепление определяются исключительно одним изложенным здесь сейсмогенно-триггерным механизмом. Климатическая система Земли сложна, и для ее описания совершенно естественно использовать «ансамблевые модели», опирающиеся на комплекс взаимодействующих геохимических, геофизических и синоптических факторов [17—21]. Рассмотренный

в данной работе механизм потепления климата добавляет к ансамблю существующих моделей еще одну — геодинамическую, нацеленную в первую очередь на объяснение причины наблюдаемой резкой смены климатических трендов в Арктике в XX и XXI вв.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема № 0149-2019-0005) и проекта РНФ № 20-17-00140.

Автор выражает благодарность Д. А. Алексееву, И. С. Владимировой и Ю. В. Габсатарову за помощь в подготовке данной статьи.

### Литература

1. Kvenvolden K. A. Methane hydrates and global climate // *Glob. Biogeochem Cycles*. — 1988. — № 2. — P. 221—229.
2. Koven C. D., Ringeval B., Friedlingstein P. et al. Permafrost carbon-climate feedback accelerated global warming // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. — 2011. — № 108 (36). — P. 14769—14774. — DOI: 10.1073/pnas.1103910108.
3. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane flux and role of sea ice // *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. — 2015. — № 373 (2052). — 20140451. — DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
4. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Comms*. — 2017. — № 8. — 15872. — DOI: 10.1038/ncomms15872.
5. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Докл. Акад. наук*. — 2012. — № 3 (446). — С. 330—335.
6. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // *Арктика: экология и экономика*. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
7. Мониторинг социально-экономического развития Арктической зоны России: Информационный бюллетень / Центр экономики Севера и Арктики. — 2020. — Вып. 50 (1—31 марта). — С. 21—22. — URL: [https://963a4334-2b68-4690-8cbf-11e0da0f83f6.filesusr.com/ugd/f29d46\\_83d606a3306a45a4ae069cb7528f804f.pdf](https://963a4334-2b68-4690-8cbf-11e0da0f83f6.filesusr.com/ugd/f29d46_83d606a3306a45a4ae069cb7528f804f.pdf).
8. Лаверов Н. П., Лобковский Л. И., Кононов М. В. и др. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя

и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. — 2013. — № 1. — С. 3—35. — DOI: 10.7868/S0016853X13010050.

9. Лобковский Л. И., Шипилов Э. В., Кононов М. В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. — 2013. — № 6. — С. 20—38. — DOI: 10.7868/S0002333713060100.

10. Elsasser W. V. Convection and stress propagation in the upper mantle: in The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors / Ed. by S. K. Runcom. — N.Y.: John Wiley, 1967. — P. 223—246.

11. Melosh H. J. Nonlinear stress propagation in the Earth's upper mantle // J. Geophys. Res. — 1976. — № 32 (81). — P. 5621—5632.

12. Гарагаш И. А. Фазовые переходы как возможный источник колебательных движений литосферы // Докл. АН СССР. — 1984. — № 5 (297). — С. 1069—1073.

13. Баренблатт Г. И., Лобковский Л. И., Низматулин Р. И. Математическая модель истечения газа из газонасыщенного льда и газогидратов // Докл. Акад. наук. — 2016. — № 4 (470). — С. 458—461. — DOI: 10.7868/S0869565216280148.

14. Ершов Э. Д., Лебедев Ю. П., Чувиллин Е. М., Якушев В. С. Экспериментальные исследования микростроения агломерата лед — гидрат метана // Инженер. геология. — 1990. — № 3. — С. 38—44.

15. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.

16. Лобковский Л. И., Рамазанов М. М. К теории фильтрации с двойной пористостью // Докл. Акад.

наук. — 2019. — № 3 (484). — С. 348—351. — DOI: 10.31857/S0869-56524843348-351.

17. Аржанов М. М., Малахова В. Д., Мохов И. И. Условия формирования и диссоциации метаногидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // Докл. Акад. наук. — 2018. — Т. 480, № 6. — С. 725—729. — DOI: 10.7868/S0869565218180202.

18. Ситнов С. А., Мохов И. И. Аномалии содержания метана в атмосфере над севером Евразии летом 2016 года // Докл. Акад. наук. — 2018. — Т. 480, № 2. — С. 223—228. — DOI: 10.7868/S0869565218140189.

19. Мохов И. И., Смирнов Д. А. Оценки вклада атлантической мультитидесятилетней осцилляции и изменения атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений // Докл. Акад. наук. — 2018. — Т. 480, № 1. — С. 97—102.

20. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферу с территории России в глобальное изменение климата в XXI веке // Докл. Акад. наук. — 2019. — Т. 488, № 1. — С. 74—80. — DOI: 10.31857/S0869-5652488174-80.

21. Мурышев К. Е., Елисеев А. В., Денисов С. Н. и др. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 55, № 3. — С. 11—19. — DOI: 10.31857/S0002-351555311-19.

### Информация об авторах

Лобковский Леопольд Исаевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, заведующий отделом геологии и геодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., д. 36), e-mail: llobkovsky@ocean.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72.

## POSSIBLE SEISMOGENIC TRIGGER MECHANISM OF ABRUPT ACTIVATION OF METHANE EMISSION AND CLIMATE WARMING IN THE ARCTIC

Lobkovsky L. I.

P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on June 8, 2020

### Abstract

The author proposes a seismogenic trigger mechanism to explain the abrupt activation of methane emission and climate warming phases in the Arctic as a result of strong mechanical disturbances in the marginal region of the Arctic lithosphere, caused by the great earthquakes in the Aleutian subduction zone, the transfer of these disturbances to the Arctic shelf and adjacent regions, and the trigger effect of the methane release from permafrost sedimentary rocks and metastable gas hydrates with subsequent emissions of greenhouse gas into the atmosphere.

**Keywords:** *activation of methane emission, sharp warming of the climate, Arctic, the great earthquakes, Aleutian subduction zone, tectonic waves, trigger mechanism, metastable gas hydrates, permafrost, gas filtration.*

The research was performed within the framework of the state assignment of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS (theme no. 0149-2019-0005) and the project of the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00140).

The author is grateful to D. A. Alekseev, I. S. Vladimirova and Yu. V. Gabsatarov for their assistance in preparing this paper.

### References

1. Kvenvolden K. A. Methane hydrates and global climate. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1988, no. 2, pp. 221—229.
2. Koven C. D., Ringeval B., Friedlingstein P., Ciais P., Cadul P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tamocai C. Permafrost carbon-climate feedback accelerated global warming. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2011, no. 108 (36), pp. 14769—14774. DOI: 10.1073/pnas.1103910108.
3. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G. et al. The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane flux and role of sea ice. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2015, no. 373 (2052), 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
4. 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. *Nature Comms*, 2017, no. 8, 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872.
5. Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. et al. Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov shel'fa morei Vostochnoi Arktiki kak vozmozhnaya prichina "metanovoi katastrofy": nekotorye rezul'taty kompleksnyi issledovaniy 2011 goda. [The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of integrated studies in 2011]. *Dokl. Akad. nauk*, 2012, no. 3 (446), pp. 330—335. (In Russian).
6. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Degazatsiya Zemli v Arktike: kompleksnye issledovaniya rasprostraneniya buvrov pucheniya i termokarstovoykh ozer s kraterami vybrosov gaza na poluostrove Yamal. [Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).
7. Monitoring sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Arkticheskoi zony Rossii: Informatsionnyi byulleten'. [Monitoring the socio-economic development of the Arctic zone of Russia]. *Tsentr ekonomiki Severa i Arktiki*, 2020, iss. 50 (1—31 mar.), pp. 21—22. Available at: [https://963a4334-2b68-4690-8cbf-11e0da0f83f6.filesusr.com/ugd/f29d46\\_83d606a3306a45a4ae069cb7528f804f.pdf](https://963a4334-2b68-4690-8cbf-11e0da0f83f6.filesusr.com/ugd/f29d46_83d606a3306a45a4ae069cb7528f804f.pdf). (In Russian).
8. Laverov N. P., Lobkovsky L. I., Kononov M. V., Dobretsov N. L., Vernikovskiy V. A., Sokolov S. D., Shipilov E. V. A geodynamic model of the evolution of the Arctic basin and adjacent territories in the Mesozoic and Cenozoic and the outer limit of the Russian Continental Shelf. *Geotectonics*, 2013, vol. 47 no. 1, pp. 1—30. DOI: 10.1134/S0016852113010044.
9. Lobkovsky L. I., Kononov M. V., Shipilov E. V. Geodynamic model of upper mantle convection and transformations of the arctic lithosphere in the Mesozoic and Cenozoic. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2013, vol. 49 no. 6, pp. 767—785. DOI: 10.1134/S1069351313060104.

10. *Elsasser W. V.* Convection and stress propagation in the upper mantle: in *The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors*. Ed. by S. K. Runcorn. N.Y., John Wiley, 1967, pp. 223—246.
11. *Melosh H. J.* Nonlinear stress propagation in the Earth's upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 1976, no. 32 (81), pp. 5621—5632.
12. *Garagash I. A.* Fazovyе perekhody kak vozmozhnyy istochnik kolebatel'nykh dvizhenii litosfery. [Phase transitions as possible origin of the lithosphere's oscillating motion]. *Dokl. AN SSSR*, 1984, no. 5 (297), pp. 1069—1073. (In Russian).
13. *Barenblatt G. I., Lobkovsky L. I., Nigmatulin R. I.* A mathematical model of gas outflow from gas-saturated ice and gas hydrates. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 470, no. 2, pp. 1046—1049. DOI: 10.1134/S1028334X16100019.
14. *Ershov E. D., Lebedenko Yu. P., Chuvilin E. M., Yakushev V. S.* Eksperimental'nye issledovaniya mikrostruktury aglomerata led — gidrat metana. [Experimental studies of the ice-methane hydrate agglomerate microstructure]. *Inzhener. geologiya*, 1990, no. 3, pp. 38—44. (In Russian).
15. *Yakushev V. S.* Prirodnyy gaz i gazovyye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
16. *Lobkovsky L. I., Ramazanov M. M.* Theory of Filtration in a Double Porosity Medium. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, no. 1, pp. 105—108. DOI: 10.1134/S1028334X19010252.
17. *Arzhanov M. M., Malakhova V. D., Mokhov I. I.* Simulation of the Conditions for the formation and dissociation of methane hydrate over the last 130 000 years. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, no. 2, pp. 826—830. DOI: 10.1134/S1028334X18060211.
18. *Sitnov S. A., Mokhov I. I.* Anomalies in the atmospheric methane content over Northern Eurasia in the summer of 2016. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, no. 1, pp. 637—641. DOI: 10.1134/S1028334X18050173.
19. *Mokhov I. I., Smirnov D. A.* Estimating the contributions of the Atlantic multidecadal oscillation and variations in the atmospheric concentration of greenhouse gases to surface air temperature trends from observations. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, no. 1, pp. 602—606. DOI: 10.1134/S1028334X18050069.
20. *Denisov S. N., Yeliseev A. V., Mokhov I. I.* Contribution of natural and anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> to the atmosphere from the territory of Russia to global climate changes in the twenty-first century. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 488, no. 1, pp. 1066—1071. DOI: 10.1134/S1028334X19090010.
21. *Muryshev K. E., Yeliseev A. V., Denisov S. N., Mokhov I. I., Arzhanov M. M., Timazhev A. V.* Phase shift between changes of global temperature and CO<sub>2</sub> content under external emissions of greenhouse gases into the atmosphere. *Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019, vol. 55, no. 3. С. 235—241. DOI: 10.1134/S0001433819030046.

---

### Information about the authors

*Lobkovsky Leopold Isaevich*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of RAS, Professor, Head of Geology and Geodynamics Department, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (36, Nahimovskiy prosp., Moscow, Russia, 117997), e-mail: llobkovsky@ocean.ru.

### Bibliographic description of the article

*Lobkovsky L. I.* Possible seismogenic trigger mechanism of abrupt activation of methane emission and climate warming in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 3 (39), pp. 62—72. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-62-72. (In Russian).

© Lobkovsky L. I., 2020