

# РОЛЬ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ МЕТАНГИДРАТОВ В ИЗМЕНЕНИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА, И НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЁТА ЭТИХ РИСКОВ В ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИКЕ

## THE ROLE OF THE DECOMPOSITION OF ARCTIC METHANE HYDRATES IN CHANGES IN THE GLOBAL CLIMATE, AND THE NEED TO TAKE THESE RISKS INTO ACCOUNT IN ECONOMIC ACTIVITIES IN THE ARCTIC



### Кершенгольц Б. М.

Доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института биологических проблем криолитозоны Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», вице-президент Академии наук Республики Саха (Якутия)

### Kershengolts B. M.

Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher Institute for Biological Problems of Permafrost, Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center Siberian Branch of Russian Academy of Sciences», Vice President of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia)



### **Лифшиц С. Х.**

Кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем нефти и газа Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

### **Lifshits S. K.**

Candidate of chemical sciences, Leading Researcher Institute of Oil and Gas Problems, Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center Siberian Branch of Russian Academy of Sciences"



### **Спектор В. Б.**

Доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук

### **Spector V. B.**

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher P. I. Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of Russian Academy of Sciences



### **Спектор В. В.**

Кандидат географических наук, зав. лабораторией общей геокриологии Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

### **Spector V. V.**

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher P. I. Candidate of Geographical Sciences, Head Laboratory of General Geocryology of the P. I. Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Аннотация.** За последние 30 лет концентрация метана в атмосфере выросла в 2,5 раза и продолжает расти в геометрической прогрессии. Так как время жизни метана в атмосфере составляет 12 лет, его потенциал глобального потепления (ПГП) составляет 72 за период 20 лет и 25 за период 100 лет (ПГП CO<sub>2</sub> за эти периоды равен 1), и темпы увеличения его концентрации в атмосфере в 2-4 раза выше, чем CO<sub>2</sub>, то уже в настоящее время вклад метана в глобальный парниковый эффект составляет по разным оценкам от 20 до 40 % по отношению к вкладу CO<sub>2</sub>, и в ближайшие несколько десятилетий между ними может быть достигнут паритет. Основным источником поступления метана в атмосферу являются метангидраты, причём в первую очередь метангидраты шельфовой и континентальной территорий Арктики. В связи с повышением температуры в высоких широтах метангидраты находятся в нетабильном состоянии. Между повышением температур в арктической

криосфере и разложением метангидратов существует положительная обратная связь, то есть этот процесс является самоускоряющимся. Следовательно, даже относительно слабое воздействие на него, в том числе антропогенного техногенного характера, способно существенно повлиять на планетарную климатическую систему. В истории Земли известны периоды, когда выбросы метана в атмосферу за счёт масштабного разложения метангидратов приводили к климатически-обусловленным биосферным катастрофам (катастрофические мезозойские и кайнозойские потепления, сопровождающиеся глобальными океаническими аноксическими событиями; последнее такое быстрое потепление  $\approx$  на  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в течение нескольких тысячелетий, фиксируется на границе палеоцена и эоцена  $\approx$  55 млн. лет назад; предполагается, что оно вызвано разложением практически всех имеющихся на тот момент океанических метангидратов). В настоящее время запасы метангидратов почти в 10 раз превышают те, которые были на границе палеоцена и эоцена. Эти оценки позволяют с уверенностью утверждать, что Арктика сегодня является не просто «кухней погоды», но и «кухней глобального климата». Задача заключается в получении дополнительной информации о строении, состоянии и газовом составе криолитозоны Восточной Арктики – крупнейшего на планете источника метана – и выработки на её основе оптимальной стратегии освоения Арктики, для того чтобы избежать дополнительного ускорения разложения метангидратов при хозяйственной деятельности в регионе.

**Annotation.** Over the past 30 years, the concentration of methane in the atmosphere has increased 2.5 times and continues to grow exponentially. Since the lifetime of methane in the atmosphere is 12 years, its global warming potential (GWP) is 72 over a period of 20 years and 25 over a period of 100 years (the GWP of  $\text{CO}_2$  over these periods is 1), and the rate of increase in its concentration in the atmosphere is 2.4 times higher than  $\text{CO}_2$ , then already at present the contribution of methane to the global greenhouse effect is, according to various estimates, from 20 to 40% in relation to the contribution of  $\text{CO}_2$ , and in the next few decades, parity can be achieved between them. The main source of methane input into the atmosphere is methane hydrates, and first of all, methane hydrates of the shelf and continental territories of the Arctic. Due to the rise in temperature at high latitudes, methane hydrates are in an unstable state. There is a positive feedback between the rise in temperatures in the Arctic cryosphere and the decomposition of methane hydrates, that is, this process is self-accelerating.

Consequently, even a relatively weak impact on it, including an anthropogenic technogenic character, can significantly affect the planetary climate system. In the history of the Earth, there are periods when methane emissions into the atmosphere due to the large-scale decomposition of methane hydrates led to climate-related biospheric disasters (catastrophic Mesozoic and Cenozoic warming accompanied by global oceanic anoxic events; the last such rapid warming of about  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , over several millennia, has been recorded at the boundary of the Paleocene and Eocene  $\approx$  55 million years ago; it is assumed that it was caused by the decomposition of almost all oceanic methane hydrates available at that time). At present, the reserves of methane hydrates are almost 10 times higher than those that were at the border of the Paleocene and Eocene. These estimates make it possible to assert with confidence that the Arctic today is not just a “kitchen of the weather”, but also a “kitchen of the global climate”. The task is to obtain additional information on the structure, state and gas composition of the permafrost zone of the Eastern Arctic - the largest source of methane on the planet, and to develop on its basis an optimal strategy for the development of the Arctic in order to avoid additional acceleration of the decomposition of methane hydrates during economic activities in the region.

**Ключевые слова:** Арктика, разложение метастабильных метангидратов, криолитозона, биосферные катастрофы, парниковый эффект, система планетарного климата.

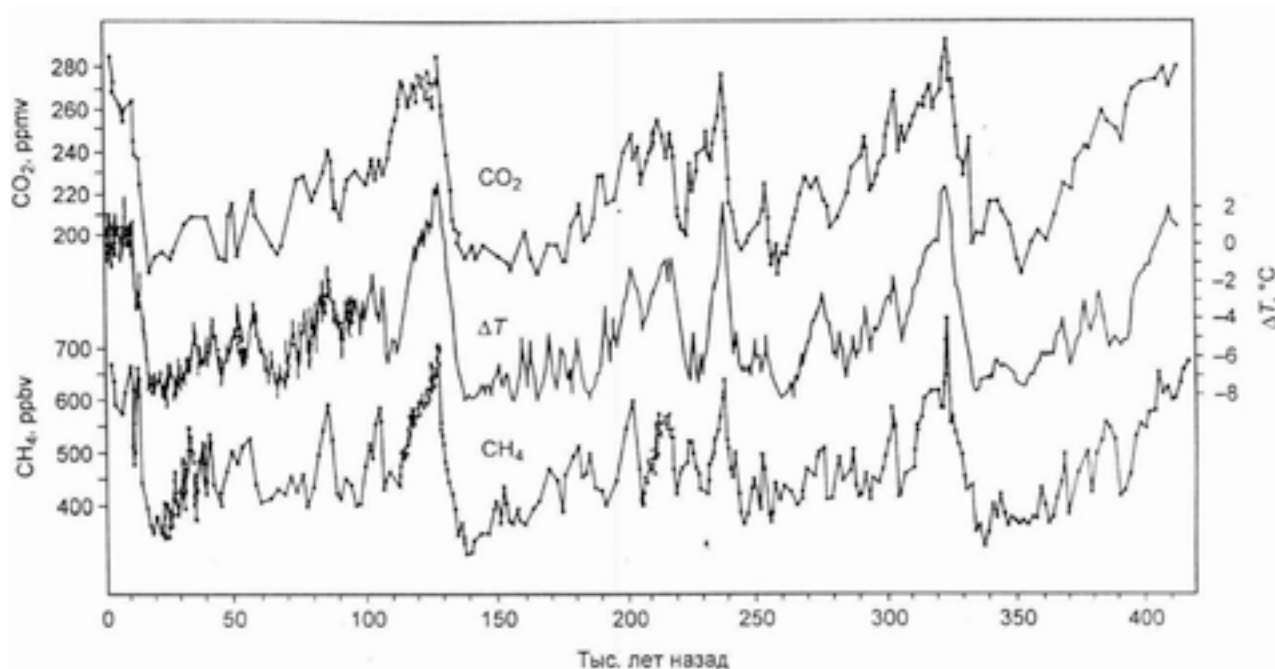
**Key words:** Arctic, decomposition of metastable methane hydrates, permafrost, biospheric disasters, greenhouse effect, planetary climate system.

Корреляционный анализ изменений температуры воздуха, концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в Антарктиде за последние 420 тысяч лет [1] (рис.

1) показывает значимость накопления метана в атмосфере (наряду с диоксидом углерода) в функционировании одной из важнейших

составляющих глобальной климатической системы — карбонатно-метановой системы саморегуляции планетарного климата [2,3].

Рис. 1. Изменения концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в атмосфере и температуры воздуха в Антарктиде за последние 420 тысяч лет [1]



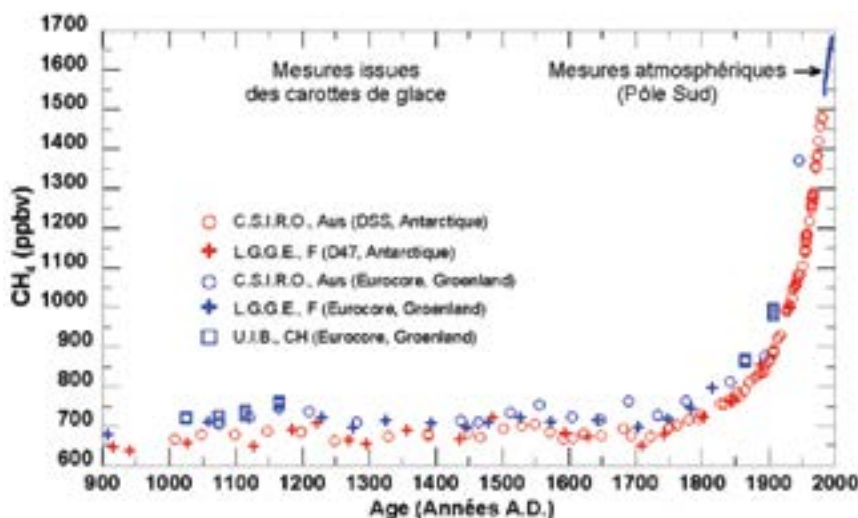
Метан — одно из трёх природных соединений (вода, углекислый газ, метан), определяющих парниковый эффект атмосферы Земли и

связанные с ним климатические изменения. По вкладу в парниковый эффект на конец XX века, первое место занимает водяной пар (36-72 %),

второе — углекислый газ (9-26 %), третье — метан (4-9 %) [4,5]. Рост концентрации метана за последнее тысячелетие представлен на рис. 2 [6].

Рис. 2. Изменения содержания метана в атмосфере с 900-го до 2000 г. нашей эры (по данным анализа пузырьков воздуха, запечатанного во льду Антарктиды и Гренландии) [6]

Синяя линия в правой, самой верхней части графика соответствует измерениям в атмосфере на Северном полюсе. Значения концентрации метана по оси Y — в миллионных частях (т. е. цифры на шкале соответствуют диапазону от 0,6 до 1,7 ppm). Разные значки соответствуют разным местам взятия колонок льда (красные значки — Антарктида, синие — Гренландия). Рис. с сайта [www-lgge.ujf-grenoble.fr](http://www-lgge.ujf-grenoble.fr)



Видно, что за последние 30 лет концентрация метана в атмосфере выросла в 2,5 раза и про-

должает расти в геометрической прогрессии. С учетом того, что время жизни метана в атмосфере составляет 12 лет (так как, в от-

личие от диоксида углерода он не поглощается Мировым океаном и окисляется лишь в верхних слоях атмосферы озоном), его потенци-

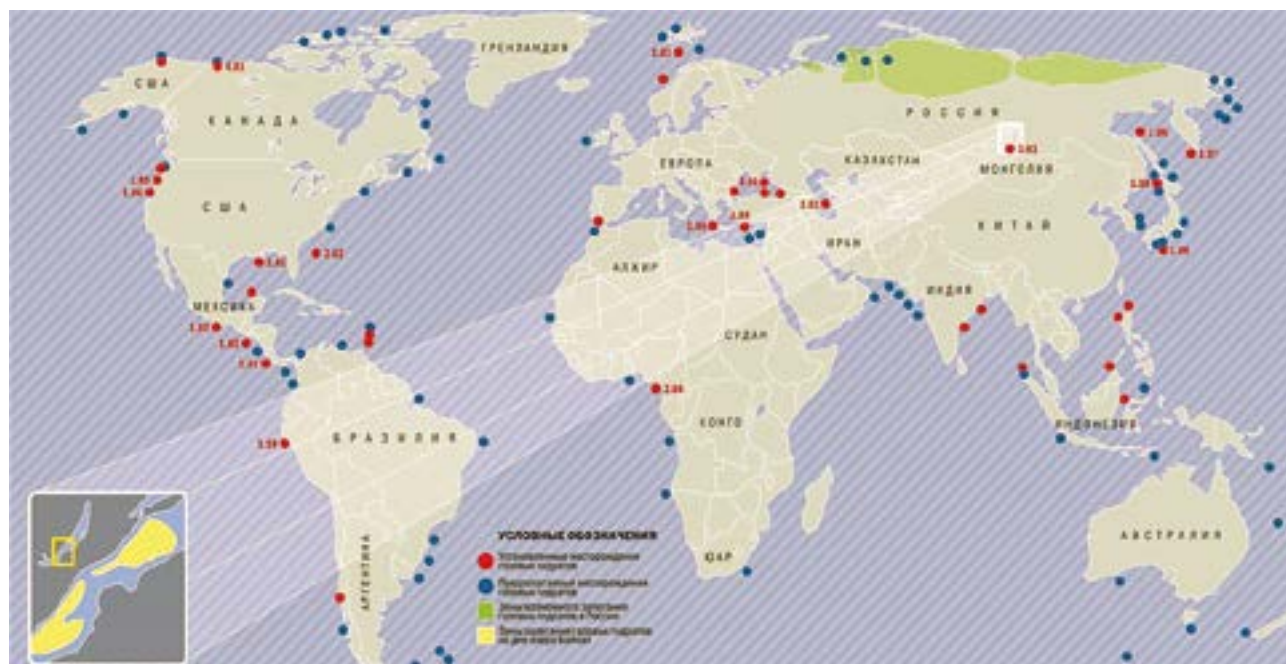
ал глобального потепления (ПГП) составляет 72 за период 20 лет и 25 за период 100 лет (ПГП CO<sub>2</sub> за эти периоды равен 1), и темпы увеличения его концентрации в атмосфере в 2-4 раза выше, чем CO<sub>2</sub>, следует признать, что уже в настоящее время вклад метана в глобальный парниковый эффект составляет по разным оценкам от 20 до 40 % по отношению к вкла-

ду CO<sub>2</sub> и в ближайшие несколько десятилетий между ними может быть достигнут паритет [7].

Одним из основных источников поступления метана в атмосферу становится процесс разложения метангидратов, которые представляют собой твёрдое вещество, супрамолекулярный комплекс метана

с водой (4CH<sub>4</sub>·23H<sub>2</sub>O), устойчивый при низких температурах и повышенных давлениях. Это наиболее широко распространённый в природе газовый гидрат — его запасы оцениваются в 1016 кг, что более чем в 100 раз превышает мировые запасы нефти. Огромное количество метангидратов было найдено в виде отложений под океанским дном по всей планете (рис. 3).

Рис. 3. Карта распространения метангидратов на планете Земля

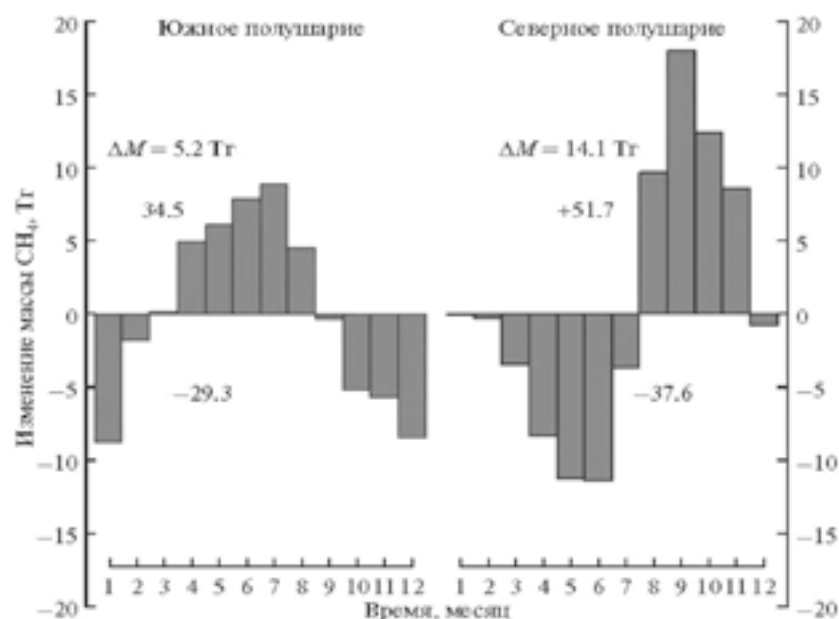


Причём, в наиболее нестабильном состоянии, вследствие низкого давления на мелководном

шельфе Арктических морей и деградации вечной мерзлоты, оказываются метангидраты именно в Арктической зоне. Вероятно, именно

по этой причине основной источник поступления метана в атмосферу расположен в криолитозоне Северного полушария (рис. 4) [8,9].

Рис. 4. Сезонная зависимость скорости изменения массы метана в атмосфере Южного и Северного полушарий в 1996 г. [8,9]







Джус Александр / GeoPhoto.ru

Метангидраты могут находиться в состоянии самоконсервации [10] за счёт образования на поверхности гидратных частиц ледяного покрытия в результате эндотермичности реакции разложения метангидратов, препятствующего свободному выделению газа из них [11]. Нарушение метастабильного состояния может произойти в результате повышения температуры криолитозоны уже на 0,5-1,0°C и/или снижения внешнего давления на 0,1-0,2 атм. Такие условия обеспечиваются повышением температуры приземного слоя воздуха в арктических районах за последние 30-50 лет [12].

По данным натурных наблюдений скорость повышения температуры приземного слоя воздуха на севере Восточно-Сибирского сектора Арктики составила 3°C за 1980-2019 гг., а температура грунтов по скважине в пос. Тикси увеличилась всего с -11 до -9,5 °C [13]. Это высокие значения, поскольку средние повышения температуры криолитозоны на Северо-Востоке составляют 0,03 °C/год. Снижению гидростатического давления и повышению проницаемости

криолитозоны может способствовать высокая сейсмичность района, активизация разломов и подъём территории арктических равнин [14], связанный, вероятно, с гляциоизостатическими движениями [15].

В континентальной части Арктики, в тундровой зоне нередко наблюдаются газовые пузырьки  $\text{CH}_4$  на поверхности озёр [16,17]. Также отмечаются его выходы в скважинах, при вскрытии подошвы слоя, отвечающего годовым колебаниям температуры в тундровой и таёжной зоне. Так как эмиссия метана растёт в северном полушарии в осенний период (см. рис. 4) с возрастанием широты местности, то можно предположить, что рост его дебита связан с температурным режимом криолитозоны. По-видимому, поступление  $\text{CH}_4$  к верхним горизонтам многолетнемёрзлых пород (ММП) обеспечивается за счёт его миграции из более глубоких горизонтов осадочного чехла, в которых сосредоточены запасы углеводородов. Кроме того, в ММП могут находиться реликтовые метангидраты. В условиях криолитозоны происходит консервация газа в виде газогидратов.

Разложение метангидратов в верхних горизонтах криолитозоны нередко приводит к формированию областей высокого давления метана. И когда оно превышает прочностные характеристики перекрывающего слоя пород, происходит взрывообразное высвобождение газа с образованием глубоких воронок. Образование знаменитых воронок на Ямале в 2014-2016 гг., а также многочисленных небольших озёр круглой формы по всей территории арктической тундры, по-видимому, является следствием разложения криолитозональных метангидратов [18]. Размеры первой обнаруженной воронки: верхний диаметр 60 м, нижний – 40 м [19]. Большую опасность в этом отношении может представлять потенциальная близость образующихся воронок от скотомогильников и захоронений людей, погибших от особо опасных инфекций в XVIII-XX веках и захороненных в верхнем слое ММП, так как образование воронок сопровождается мощными взрывами за счёт высокого давления газа, скапливающегося под перекрывающими мёрзлыми грунтами. Взрывной волной споры бактерий могут разноситься

на десятки и сотни метров. Например, только разброс грунта при образовании одной из воронок на Ямале составил до 120 м. Не исключено, что вспышка сибирской язвы летом 2017 года на Ямале объясняется климатическими изменениями не только на погодном уровне (жаркий июль), но и за счёт разложения метангидратов при оттайке ММП.

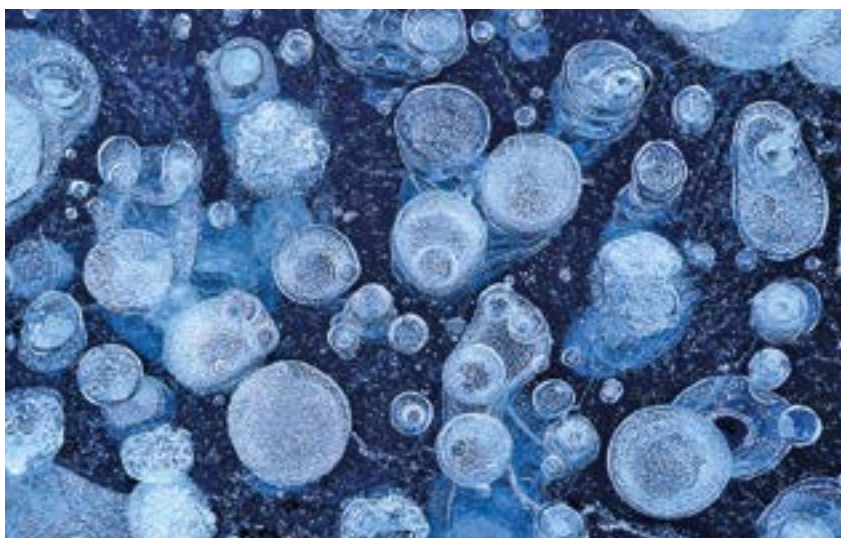
Мелководный шельф арктических морей, преимущественно морей Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское), является самым обширным и мелководным шельфом Мирового океана, вмещает значительную часть мелководных метангидратов и 80 % субаквальной мерзлоты [20], вследствие чего он рассматривается в качестве основного поставщика метана в Северном полушарии [5,21].

Большинство современных моделей эмиссии метана построено на представлениях о формировании криолитозоны шельфа морей Восточной Арктики в среднем и позднем неоплейстоцене в субазральных условиях и затоплении этой территории морем в голоцене. Проведённые в последние годы геологические [22] и геофизические [23] исследования показали, что в пределах шельфа на отдельных участках распространены морские терригенные отложения среднего и позднего неоплейстоцена (максимум последнего оледенения). Кроме того, значительные площади шельфа морей Восточной Арктики были занята ледниками [15]. Эти данные позволяют усомниться в существовании на шельфе морей Восточной Арктики низкотемпературной сплошной многолетней мерзлоты. Здесь, вполне вероятно, распространение прерывистой и островной мерзлоты, а также охлаждённых пород. Акустическая прозрачность толщи предпо-

жительно мёрзлых пород шельфа и её высокое электрическое сопротивление, наблюдаемые при геофизических исследованиях, могут быть объяснены насыщенностью осадочного чехла шельфа метангидратами, находящимися в метастабильном состоянии (самоконсервации). Высказанная гипотеза подтверждается исследованиями Д. А. Галичинского и др. [24], которые показали, что многолетнемёрзлые породы не проницаемы для метана, его диффузии в мёрзлых насыщенных льдом породах не происходит. Выделение метана регистрируется и в западной части Арктики, например, в море Бофорта. Однако массовые выбросы метана наблюдаются именно в Восточной части Арктического побережья. Это свидетельствует о том, что именно Восточная часть Арктики в настоящее время является «кухней» формирования глобального климата и его изменений.

Недавние исследования, проведённые в Сибирской Арктике, показали, что уже высвободились миллионы тонн метана – по-видимому, за счёт разрывов в вечной мерзлоте на морском дне [25]. В результате этого его концентрация в некоторых регионах выросла более чем в 100 раз [26]. Так на шельфе Восточ-

ной Арктики имеют место аномально высокая концентрация метана в воде [5,7,21], высокий фоновый поток  $\text{CH}_4$  и высокодебитные локальные источники газа [20]. Эмиссия  $\text{CH}_4$  в среднем составляет 3 мг/м<sup>2</sup>·сутки, а из его локализованных плюмов на шельфе – до 13 мг/м<sup>2</sup>·сутки [20]. За период свободный ото льда локальные источники метана на Восточно-Арктическом шельфе поставляют до 13,7·10<sup>4</sup>г·км<sup>2</sup> метана в течение года [21]. Высокие концентрации метана в воде и надводных слоях воздуха указывают на значительную проницаемость субаквальной криолитозоны Арктических морей. Поверхностные воды половины изученной акватории были перенасыщены метаном в среднем в 8,8 раз. Отмечаются чётко ограниченные области, в которых концентрации растворённого  $\text{CH}_4$  были экстремально высокими, превышая средние в 80-1400 раз. Отмечались также пузырьковые струи газа, которые, скорее всего, связаны с разрушением метангидратов [21]. Многочисленные наблюдения показывают, что метангидраты могут находиться и у самой поверхности дна в том случае, если содержание гидратообразующего газа превышает предел его растворимости в воде. Для поддержания столь высокой концентрации



газа в случае образования метангидратов необходимо существование постоянного подтока  $\text{CH}_4$  к поверхности дна [27]. Вероятно, в данном случае имеет место образование диссипативных газогидратных структур на стоке выбросов глубинных флюидов.

Избыток метана был обнаружен в отдельных местах в месте впадения реки Лена и на границе между морем Лаптевых и Восточно-Сибирским морем. Современный уровень выбросов метана ранее оценивался как 0,5 мегатонны в год и при этом делается предположение, что не менее 1400 Гт углерода в настоящий момент «заперто» в виде метана и метангидратов под арктической подводной вечной мерзлотой, и 5-10 % от этого количества поступает к поверхности через окна в ММП [21]. Авторы работ [28, 29] приходят к выводу, что «резкое высвобождение вплоть до 50 Гт гидратов весьма вероятно в любой момент». Это увеличит содержание метана в атмосфере в 12 раз. Это будет эквивалентно по парниковому эффекту удвоению текущего уровня  $\text{CO}_2$ .

Следствием того, что на дне морей Восточной Арктики метангидраты находятся в неустойчивом состоянии и разрушаются даже при небольших вмешательствах в окружающую среду, является, например, то, что в море Лаптевых в районе дельты реки Лена наблюдались выбросы газа из донных источников, вызванные просто работой судового двигателя [30]. При этом в отдельных случаях возникали выбросы с мощностью 0,7-2,1 г  $\text{CH}_4$ /сек, сопоставимые с мощностями глубоководных грязевых вулканов.

В 2008 году США определили потенциальную дестабилизацию метангидратов в Арктике как один из четырёх наиболее серьёзных сценариев клима-

#### Литература:

- Адушкин В. В., Соловьев С. П., Турунтаев С. Б. Соотношение антропогенной и природной составляющих в потоке газов в атмосферу // Глобальные изменения природной среды. 2001. Новосибирск: Изд-во СО РАН «ГЕО», 2001. С. 249-264.
- Спектор В. Б., Кершенгольц Б. М., Лифшиц С. Х., Спектор В. В. Карбонатно-метановая система саморегуляции планетарного климата // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 6. С. 1-12.
- Лифшиц С. Х., Спектор В. Б., Спектор В. В., Кершенгольц Б. М. Разложение метангидратов и деградация мерзлоты в Северо-Восточном регионе Арктики — один из основных факторов дестабилизации современного климата. Сб. науч. трудов Всероссийской конф. с междунар. участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», посвященная 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова». 2020. Архангельск. С. 127-131.
- Болдырев В. М. Водяной пар и «парниковый эффект» // Информационное агентство Regnum. 26.02.2016. <https://regnum.ru/news/innovatio/2086744.html>
- Киселев А. А., Решетников А. И. Метан в российской Арктике: результаты наблюдений и расчётов. Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 2 (96). С. 5-14
- Гиляров А. М. Колебания метана в атмосфере: человек или природа — кто кого. — 2006 // [http://elementy.ru/novosti\\_nauki/430350/Kolebaniya](http://elementy.ru/novosti_nauki/430350/Kolebaniya)
- Шахова Н. Е. Метан в морях Восточной Арктики. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.08 Океанология. Институт океанологии им. П. П. Ширшова. Российская академия наук. М., 2010. С. 48.
- Адушкин В. В., Кудрявцев В. П. Глобальный поток метана в атмосферу и его сезонные вариации // Физика Земли, 2010, №4. С. 78-85.
- Адушкин В. В., Кудрявцев В. П. Оценка глобального потока метана в атмосферу и его сезонных вариаций // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2013, Т. 49, №2. С.144-152.
- Мельников В. П., Нестеров А. Н., Поденко Л. С., Решетников А. М., Шаламов В. В. Метастабильные состояния газовых гидратов при давлениях ниже давления равновесия лёд-гидрат-газ. Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 80–83.
- Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях. М., Недра, 1992, 236 с.
- Зеленина Л. И., Федькушова С. И. Прогнозирование и последствия изменения климата Арктического региона // Арктика и Север. 2012, №5. С. 1-5.
- Дубровин В. А., Брушков А. В., Дроздов Д. С., Железняк М. Н. Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики. Минеральные ресурсы России. 2019. №3. С. 55-64
- Бочаров Г. В., Гусев Г. С., Есикова Л. В., Спектор В. Б. Карта современных вертикальных движений территорий Якутской АССР // Геотектоника, 1982, №3 С. 60-64.
- Разумов С. О., Спектор В. Б., Григорьев М. Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // Океанология. Т. 54. № 5, 2014. С. 679-693.
- Вальтер К. М., Зимов С. А., Шантон Дж. П., Вербила Д., Чапин III Ф. С. 2006. Пузырьки метана из сибирских талых озёр как положительный ответ на потепление климата. Nature 443: 71-75.
- Уолтер К. М., Эдвардс М. Е., Гросс Г., Зимов С. А., Чапин III Ф. С. 2007. Термокарстовые озёра как источник атмосферного  $\text{CH}_4$  во время последнего обледенения. Science 318: 633-636.
- Аржанов М. М., Мохов И. И., Денисов С. Н. Дестабилизация реликтовых метангидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика, 2016. №4 (24). С. 48-51.
- Денисов С. Н., Аржанов М. М., Елисеев А. В., Мохов И. И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // ДАН (геофизика). 2011. Т. 441, № 5. С. 685-688



тических изменений, которые должны исследоваться приоритетным образом [31]. Как отметила Н. Е. Шахова [32] в 2015 году, «... в то время как на участках мирового океана за пределами России влияние деградации подводной вечной мерзлоты только начинается, именно на сибирском шельфе оно приняло угрожающий масштаб».

По состоянию на 2017 год скорость таяния подводной шельфовой мерзлоты в Восточно-Сибирском море составляет около 18 см/год, что гораздо выше прогнозных оценок. На многих участках истончение прикрывающей метангидраты мерзлоты уже приближается к критическому уровню, после которого метан из гидратов может начать поступать в водную толщу и атмосферу [33].

Увеличение температуры поверхности Земли на 3 °С может привести к дестабилизации ≈85 % существующих залежей океанических метангидратов, что приведёт к высвобождению (4-8)·10<sup>3</sup> Гт углерода, в то время как его количество (в форме метана и двуокиси углерода) в современной атмосфере составляет всего 730-760 Гт [7, 19, 21].

В истории Земли такого рода события уже имели место — это катастрофические мезозойские и кайнозойские потепления, сопровождающиеся глобальными океаническими аноксическими событиями (ОАЕ) [34]. С этим, вероятно, связан позднепалеоценовый термальнейший максимум. Такое высвобождение могло также сыграть свою роль во внезапном разогреве целиком замёрзшей Земли 630 млн лет назад [35]. Последнее такое быстрое потепление (в течение нескольких тысячелетий) фиксируется на границе палеоцена и эоцена ≈ 55 млн лет тому назад — климатическое название Paleocene-Eocene

· Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П., Дударев О. В., Дмитриевский Н. Н., Шахова Н. Е., Романовский Н. Н., Космач Д. А., Никольский Д. Н., Никифоров С. Л., Саломатин А. С., Ананьев Р. А., Росляков А. Г., Салюк А. Н., Карнаух В. В., Черных Д. Б., Тумской В. Е., Юсупов В. И., Куриленко А. В., Чувилин Е. М., Буханов Б. А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина "метановой катастрофы": некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН 2012, том 446, № 3, С. 330-335.

· Шахова Н. Е., Семилетов И. П., 2014 Метан в морях Восточной Арктики: избранные результаты исследования (1994-2014) <http://www.gas.ru/FStorage/download.aspx?id=0e8cedce-f45f-4645-ab67-8cebe88e6b66>

· Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-53 (о. Столбовой), 54 (Ляховские о-ва). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 310 с.

· Виноградов В. А., Горячев Ю. В., Гусев Е. А., Супруненко О. И. Осадочный чехол Восточно-Арктического шельфа России и условия его формирования в системе материк-океан. 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане (под ред. В. Л. Иванова). СПб.: ВНИИ-Океангеология, 2008, с. 63-78.

· Гиличинский Д. А. Метан в вечномёрзлых породах. Информационный бюллетень РФФИ, 6 (1998). НАУКИ О ЗЕМЛЕ [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_754960\\_46589639.htm](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_754960_46589639.htm)

· Пузырьки метана на морском дне создают подводные холмы Архивировано 11.10.2008, Исследовательский институт аквариума Монтерей-Бей, 5 февраля 2007. [https://www.3mbari.org/news/news\\_releases/2007/paull-plfs.html](https://www.3mbari.org/news/news_releases/2007/paull-plfs.html)

· Стив Коннор, Эксклюзив: метановая бомба замедленного действия, The Independent, 23 сентября. 2008. <https://www.independent.co.uk/climate-change/news/exclusive-the-methane-time-bomb-938932.html>

· Анфилатова Э. А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т.3. №4. С. 1-15.

· Н. Шахова, И. Семилетов, А. Салюк, Д. Космач Аномалии метана в атмосфере над Восточно-Сибирским шельфом: есть ли признаки утечки метана из гидратов мелководного шельфа? // Тезисы геофизических исследований, Vol. 10, EGU2008-A-01526, 2008. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01526 EGU General Assembly 2008 <https://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/01526/EGU2008-A-01526.pdf>

· Фолькер Мрассек, В Сибири открывается склад парниковых газов, Spiegel International Online, 17 April 2008

· Шахова Н. Е., Юсупов В. А., Салюк А. Н., Космач Д. А., Семилетов И. П. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе // ДАН. Т. 429. № 3. 2009. С. 398-401.

· Национальные лаборатории США исследуют резкие изменения климата. Служба новостей окружающей среды (22 сентября 2008). <http://www.ens-newswire.com/ens/sep2008/2008-09-22-02.asp>

· ТАСС: Наука — Учёные: выбросы метана в Арктике могут спровоцировать глобальное потепление на планете. <https://nauka.tass.ru/nauka/2296396>

· Подводная мерзлота на арктическом шельфе тает быстрее, чем считалось прежде <https://tass.ru/obschestvo/4471735>

· Юдович Я. Э. Давосская геохимическая мода — 2009 // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2009. № 7. С. 25-33.

· Мартин Кеннеди, Дэвид Мрофка и Крис фон дер Борх (2008), Снежный ком прекращения действия Земли из-за дестабилизации экваториальной вечной мерзлоты клатрата метана, Nature 453 (22 May), с. 642-645.

· Голицын Г. С., Гинзбург А. С. Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад // ДАН, 2007, Т. 413, № 6. С. 816-819.

· С. Х. Лифшиц, В. Б. Спектор, Б. М. Кершенгольц, В. В. Спектор Новый взгляд на роль метана и гидратов метана в эволюции глобального климата // Американский журнал изменения климата (AJCC). Том 7. № 2. 2018. С. 236-252. DOI: 10.4236/ajcc.2018.72016

Thermal Maximum (РЕТМ). Предполагается, оно вызвано разложением практически всех имеющихся на тот момент океанических метангидратов (около 1200 Гт;  $\approx 1/10$  части современных запасов) [19, 35, 36].

**Учитывая тот факт, что основной прирост концентрации метана в атмосфере в настоящее время наблюдается в высоких широтах Северного полушария – в Арктике и определяется, по-видимому, температурным режимом криолитозоны, а климатические катастрофы в истории Земли были связаны с беспрецедентным ростом концентрации метана в атмосфере, необходимо с особой осторожностью подходить к освоению Арктической зоны, в которой сосредоточены огромные запасы метангидратов, значительная доля которых уже в настоящее время находится в предкритическом нестабильном состоянии [37].**

Ученые пытаются понять, что мы сейчас наблюдаем: потепление или похолодание. На самом деле, согласно рис. 1, планетарная климатическая система (ПКС) в настоящее время находится в состоянии «детерминированного хаоса». Об этом свидетельствует резкое расширение географической встречаемости, учащение и увеличение амплитуд погодных колебаний (температурные, влажностные, ветровые аномалии и катаклизмы). Из этого «хаоса» есть два выхода: возвращение ПКС на ветвь похолодания или переход её в неуправляемую область глобального потепления. Причём именно в этом состоянии ПКС, как самоорганизующаяся система, оказывается очень чувствительной даже к очень низкоэнергетическим воздействиям. Например, к действию антропогенного (техногенного) фактора, который пока ещё по энергетическому потен-

## Literature

- Adushkin V. V., Soloviev S. P., Turuntaev S. B. The ratio of anthropogenic and natural components in the flow of gases into the atmosphere // *Global changes in the natural environment* 2001. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS "GEO", 2001. P. 249-264.
- Spektor V. B., Kershengolts B. M., Lifshits S. Kh., Spektor V. V. Carbonate-methane self-regulation system of the planetary climate // *Izvestia RAN. Geographic series*. 2007. No. 6. P. 1-12.
- Lifshits S. Kh., Spektor V. B., Spektor V. V., Kershengolts B. M. Decomposition of methane hydrates and degradation of permafrost in the North-Eastern region of the Arctic is one of the main factors in the destabilization of the modern climate. *Sat. scientific. Proceedings of the All-Russian Conf. with int. participation "Global problems of the Arctic and Antarctic", dedicated to the 90th anniversary of the birth of Acad. Nikolai Pavlovich Laverov* ". 2020. Arkhangelsk. P. 127-131.
- Boldyrev V. M. Water vapor and the "greenhouse effect" // *Regnum Information Agency*. 02/26/2016. <https://regnum.ru/news/innovatio/2086744.html>
- Kiselev A. A., Reshetnikov A. I. Methane in the Russian Arctic: Observations and Calculations. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2013, No. 2 (96). P. 5-14.
- Gilyarov A. M. Oscillations of methane in the atmosphere: man or nature – who wins. 2006. // [http://elementy.ru/novosti\\_nauki/430350/Kolebaniya](http://elementy.ru/novosti_nauki/430350/Kolebaniya)
- Shakhova, N. Ye. Methane in the seas of the Eastern Arctic. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, specialty 25.00.08 Oceanology. Institute of Oceanology named after P. P. Shirshov. The Russian Academy of Sciences. M., 2010. 48 p.
- Adushkin V. V., Kudryavtsev V. P. Global flow of methane into the atmosphere and its seasonal variations // *Physics of the Earth*, 2010, no. P. 78-85.
- Adushkin V. V., Kudryavtsev V. P. Estimation of the global flow of methane into the atmosphere and its seasonal variations // *Izvestia RAN. Physics of the atmosphere and ocean*, 2013, V. 49, No. 2. Pp. 144-152.
- Melnikov V. P., Nesterov A. N., Podenko L. S., Reshetnikov A. M., Shalamov V. V. Metastable states of gas hydrates at pressures below the ice-hydrate-gas equilibrium pressure. *Cryosphere of the Earth*, 2011, vol. XV, no. 4, p. 80-83.
- Istomin V. A., Yakushev V. S. Gas hydrates in natural conditions. M., Nedra, 1992, 236 p.
- Zelenina L. I., Fedkushova S. I. Forecasting and consequences of climate change in the Arctic region // *Arctic and North*. 2012, no. 5. P. 1-5.
- Dubrovin V. A., Brushkov A. V., Drozdov D. S., Zheleznyak M. N. Knowledge, current state, prospects and problems of the Arctic permafrost development. *Mineral resources of Russia*. 2019. No. 3. P. 55-64.
- Bocharov G. V., Gusev G. S., Esikova L. V., Spektor V. B. Map of modern vertical movements of the territories of the Yakut ASSR // *Geotectonics*, 1982, No. 3 P.60-64.
- Razumov S. O., Spektor V. B., Grigoriev M. N. Model of the Late Cenozoic evolution of the cryolithozone of the shelf of the western part of the Laptev Sea // *Oceanology*. T. 54. No. 5, 2014. P. 679-693.
- Walter, K. M., Zimov, S. A., Chanton, J. P., Verbyla, D., Chapin III, F. S. 2006. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature* 443: 71-75.
- Walter, K. M., Edwards, M. E., Grosse, G., Zimov, S. A., Chapin III, F. S. 2007. Thermokarst Lakes as a Source of Atmospheric CH<sub>4</sub> During the Last Deglaciation. *Science* 318: 633-636.
- Arzhanov M. M., Mokhov I. I., Denisov S. N. Destabilization of relict methane hydrates under observed regional climate changes // *Arctic: ecology and economics*, 2016. № 4 (24). P. 48-51.
- Denisov S. N., Arzhanov M. M., Eliseev A. V., Mokhov I. I. Assessment of the response of subaqueous methane hydrate deposits to possible climate changes in the 21st century // *DAN (geophysics)*. 2011. T. 441, No. 5. P. 685-688.

циалу, конечно, не сопоставим с процессами, происходящими в ПКС, но выступая в качестве «управляющего параметра» может оказать решающее влияние на то, по какой траектории будет происходить развитие ПКС, находящейся в состоянии «детерминированного хаоса» [37].

Из вышеизложенного следует, что в условиях «климатического кризиса», который в настоящее время переживает наша планета, антропогенный, техногенный фактор именно Арктике может внести необратимые последствия в выбор саморегулируемой климатической системы дальнейшей траектории её развития, вследствие чего повышается ответственность человечества за свою деятельность и прежде всего именно в Арктике [37].

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Исследование биогеохимических циклов и адаптивных реакций растений бореальных и арктических экосистем северо-востока России» (тема № 0297-2021-0024, ЕГИСУ НИОКТР №АААА- А21-121012190034-2), «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (тема № 0297-2021-0025, ЕГИСУ НИОКТР №АААА-А-А21-121012190034-9), а также «Закономерности развития береговой и подводной мерзлоты в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском» (№ 0303-2019-0003). Её выполнение финансово поддержано грантом РФФИ, Проект №18-45-140009 р. а.

· Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P., Dudarev O. V., Dmitrevsky N. N., Shakhova N. E., Romanovsky N. N., Kosmach D. A., Nikolsky D. N., Nikiforov S. L., Salomatin A. S., Ananiev R. A., Roslyakov A. G., Salyuk A. N., Karnaukh V. V., Chernykh D. B., Tumskey V. E., Yusupov V. I., Kurylenko A. V., Chuvilin E. M., Bukhanov B. A. Degradation of submarine permafrost and destruction of hydrates on the shelf of the seas of the eastern Arctic as a possible cause of the "methane catastrophe": some results of comprehensive studies in 2011 // DAN 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330-335.

· Shakhova N. E., Semiletov I. P., 2014 Methane in the seas of the Eastern Arctic: selected research results (1994-2014) <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=0e8cedce-f45f-4645-ab67-8ce6e88e6b66>

· State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Laptev-Siberian Sea series. Sheet S – 53 (Stolbovoi Island), 54 (Lyakhovskie Islands). Explanatory note. SPb.: Cartographic factory VSEGEI, 2016. 310 p.

· Vinogradov V. A., Goryachev Yu. V., Gusev E. A., Suprunenko O. I. Sedimentary cover of the East Arctic shelf of Russia and conditions of its formation in the continent-ocean system. 60 years in the Arctic, Antarctic and the World Ocean (edited by V.L. Ivanov). SPb.: VNIIOkeangeologiya, 2008, p. 63-78.

· Gilichinsky D. A. Methane in permafrost. RFBR Information Bulletin, 6 (1998). Earth SCIENCES [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_754960\\_46589639.htm](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_754960_46589639.htm)

· Methane bubbling through seafloor creates undersea hills Archived 11.10.2008, Monterey Bay Aquarium Research Institute, 5 february 2007. [https://www3.mbari.org/news/news\\_releases/2007/paull-plfs.html](https://www3.mbari.org/news/news_releases/2007/paull-plfs.html)

· Steve Connor, Exclusive: The methane time bomb, The Independent, 23 September 2008. <https://www.independent.co.uk/climate-change/news/exclusive-the-methane-time-bomb-938932.html>

· Anfilatova E. A. Analytical review of modern foreign data on the problem of distribution of gas hydrates in the water areas of the world // Neftegazovaya Geologiya. Theory and practice. T. 3. No. 4. C. 1-15.

· N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, D. Kosmach Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates? // Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-01526, 2008. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01526 EGU General Assembly 2008 <https://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/01526/EGU2008-A-01526.pdf>

· Volker Mrasek, A Storehouse of Greenhouse Gases Is Opening in Siberia, Spiegel International Online, 17 April 2008

· Shakhova, N. E., Yusupov, V. A., Salyuk, A. N., Kosmach, D. A., Semiletov I. P. Anthropogenic factor and methane emission on the East Siberian shelf // Dokl. T. 429. No. 3. 2009. P. 398-401.

· U. S. National Labs Probe Abrupt Climate Change. Environment News Service. 22 September 2008. <http://www.ens-newswire.com/ens/sep2008/2008-09-22-02.asp>

· TASS: Science – Scientists: methane emissions in the Arctic can provoke global warming on the planet <https://nauka.tass.ru/nauka/2296396>

· Underwater permafrost on the Arctic shelf is melting faster than previously thought <https://tass.ru/obschestvo/4471735>

· Yudovich Ya. E. Davos geochemical fashion-2009 // Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. - 2009. No. 7. P. 25-33.

· Martin Kennedy, David Mrofka and Chris von der Borch (2008), Snowball Earth termination by destabilization of equatorial permafrost methane clathrate, Nature 453 (29 May), 642-645.

· Golitsyn G. S., Ginzburg A. S. Estimates of the possibility of "rapid" methane warming 55 million years ago // DAN, 2007, T. 413, No. 6. P. 816-819.

· S. Kh. lifshits, V. B. Spektor, B. M. Kershengolts, V. V. Spektor A new look at the role of methane and methane hydrates in the evolution of global climate // American Journal of Climate Change (AJCC). Vol. 7 No. 2 2018. P. 236-252. DOI: 10.4236/ajcc.2018.72016