

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ

под редакцией И. И. Мохова и В. А. Семенова



Москва
ФИЗМАТКНИГА
2022

ББК 20.18 + 26.237
К492
УДК 502.3:551.58(043.2)

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ. Под ред. И. И. Мохова и В. А. Семенова. — М.: Физматкнига, 2022. — 360 с. — ISBN 978-5-89155-286-9.

В книге представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН в сотрудничестве с другими научными институтами и организациями в течение последних лет при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00647) и Программ Российской академии наук. В первой части приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Во второй части рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. В третьей части приведены оценки возможных будущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

Для научных работников, специалистов в рассматриваемых областях, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Научное издание

КЛИМАТ АРКТИКИ: ПРОЦЕССЫ И ИЗМЕНЕНИЯ

Под редакцией
Мохова Игоря Ивановича,
Семенова Владимира Анатольевича

Верстка выполнена в издательстве «Физматкнига»

Редактор издательства *А. К. Розанов*
Операторы верстки *И. А. Розанов, К. В. Чувилин*

Издательство «Физматкнига».
141701, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 3а.
Тел. (499) 390-51-38.

Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 29,2. Уч.-изд. л. 29,5. Тираж 120 экз.

Отпечатано с готовых pdf-файлов в ООО «Фотоэксперт».
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

ISBN 978-5-89155-286-9



9 785891 552869

© Коллектив авторов, 2022

© Физматкнига, 2022

7.4. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке

С. Н. Денисов, А. В. Елисеев, И. И. Мохов

Метангидраты — соединения, в которых молекулы метана находятся в ячейках, образованных молекулами воды. Они широко распространены в областях вечной мерзлоты и донных осадочных породах океана вдоль континентальных склонов, где они стабильны при современных значениях температуры и давления.

Метангидраты — потенциально огромный источник энергии по сравнению с другими известными источниками углеводородов. Суммарные запасы углерода в гидратах оцениваются в $(0,5 \div 10) \cdot 10^3$ ГтС [Kvenvolden, 1988; O'Connor et al., 2010] — значительной величиной в сравнении с $3,8 \cdot 10^4$ ГтС углерода, растворенного в океане, $2 \cdot 10^3$ ГтС в почве и растениях и $7,3 \cdot 10^2$ ГтС в атмосфере. Суммарные запасы ископаемого горючего, включая уголь, составляют около $5 \cdot 10^3$ ГтС [Renssen et al., 2004], т. е. сопоставимы по запасам в одних только гидратах.

Метан — третий (после водяного пара и углекислого газа) по общему влиянию на радиационный баланс земной климатической системы парниковый газ, который может выбрасываться в атмосферу в результате добычи и использования гидратов как источника энергии. Резкие выбросы метана из метангидратов могут происходить из-за масштабных подводных сдвигов земной коры и из-за повышения температуры донных осадочных пород. По модельным оценкам при более теплом на несколько градусов океане запасы метана в гидратах должны быть существенно меньше (Buffet and Archer, 2004). Выбросы метана при разложении метангидратов могли быть причиной быстрых климатических изменений в прошлом [Dickens et al., 1995; Мохов и др., 2005; Мохов и др., 2010; Сергиенко и др., 2012; Climate Change 2013].

Палеоцен-эоценовый температурный максимум — широко известный пример периода с резким изменением климата, возможно, связанным с масштабным высвобождением метана из гидратов 55 миллионов лет назад. В некоторых районах (включая Карибское море, Северную Атлантику, море Уэдделла, тропики Тихого океана) было обнаружено смещение в $-2,5 \div 3\% \delta^{13}\text{C}$ в биогенном карбонате и органике, которое можно связать с высвобождением 1500–2000 Гт метана за несколько тысяч лет [Dickens et al., 1995; Голицын и Гинзбург, 2007]. Такой огромный выброс метана способен оказать сильное влияние на климат. Измерения композиции изотопов кислорода и отношения Mg/Ca фораминифер показывают, что температура поверхности океана резко увеличивалась на 1–8 °C (в зависимости от региона) [Renssen et al., 2004]. Значительное выделение метана повлияло также на химический состав океана. Донные отложения во время палеоцен-эоценового температурного максимума во всех океанах выявляют выраженное растворение карбонатов.

Большие температурные скачки во время последнего ледникового периода можно также связать с резкими выбросами метана из метангидратов [Renssen et al., 2004]. Выбросы метана могли быть связаны с изменением уровня моря и нестабильностью метангидратов на континентальных склонах.

Ожидаемое потепление климата в будущем может привести к дестабилизации гидратов, ускоренной эмиссии метана и усилению общего потепления с учетом формирования соответствующей положительной обратной связи. Оценки возможных выбросов метана из залежей метангидратов при потеплении и потенциала их воздействия на изменение климата становятся все более актуальными.

Термодинамическая стабильность гидратов в донных отложениях и, соответственно, зона их стабильности зависят от температуры, давления и солености воды. В регионах существования метангидратов гидростатическое давление у дна превосходит давление, необходимое для стабильности гидратов при температуре, равной температуре придонной воды. Верхней границей зоны образования гидратов является дно, выше которого образования гидратов не происходит из-за недостаточной концентрации метана. С увеличением глубины ниже дна гидростатическое давление растет линейно, температура также растет линейно (в условиях равновесия) в связи с геотермальным потоком тепла. При этом давление, необходимое для стабильности метангидратов, экспоненциально зависит от температуры. В результате существует максимальная глубина, на которой могут образовываться метангидраты, где гидростатическое давление равно давлению стабильности.

Увеличение придонной температуры ведет к изменению профиля температуры в донных отложениях и соответствующему сдвигу границ зоны стабильности. В данной работе оцениваются возможные выбросы метана при дестабилизации залежей метангидратов в XXI веке при изменениях придонной температуры воды по расчетам с разными климатическими моделями при учете антропогенных воздействий, в частности при сценарии SRES A2 [Climate Change 2001].

В [Денисов и др., 2011] получены модельные оценки характеристик термического и гидрологического режимов пород при различных сценариях изменения климата, в которых для расчета температуры в донных отложениях использовалась модель процессов тепло- и влагопереноса, разработанная в ИФА РАН [Аржанов и др., 2008] и адаптированная для моделирования донных отложений. В качестве граничных условий задавалась температура придонной воды по расчетам с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL для верхней границы расчетной области и геотермический поток тепла на нижней границе. В качестве начальных условий задавался градиент температуры в донных отложениях, соответствующий равновесному состоянию донных отложений при придонной температуре в начале XXI века. Глубина расчетной области была в пределах 830 м.

Глубина залегания гидратов в осадочном слое и их пространственное распределение моделировались путем совместного решения уравнений равновесного стабильного существования гидратов и изменения температурного режима в слое донных отложений. При этом считалось, что гидраты стабильны в донных отложениях всюду, где гидростатическое давление больше равновесного для расчетной температуры. Уравнение зависимости равновесного давления от температуры задавалось согласно [Reagan and Moridis, 2008]. Считалось, что гидраты занимают 5% порового пространства [Holbrook et al., 1996].

Для образования гидратов необходима достаточно высокая концентрация метана, поэтому гидраты существуют только в условиях значительного содержания органики в донных отложениях и высокой скорости седиментации. В связи с этим гидратоносные акватории в расчетах ограничивались глубиной моря до 3000 м [Buffet and Archer, 2004]. Гидратоносные залежи могут существовать во внутренних и окраинных морях и при большей глубине (например, в Мексиканском заливе), однако глубоководные гидраты очень стабильны (не дестабилизируются при повышении температуры воды в пределах нескольких градусов). Общие запасы метана в газогидратных залежах с использованием модельных расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL можно оценить (по расчетам на 2001 г.) в $(10 \div 14,5) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ при стандартных условиях (600–870 ГтС). Это в пределах диапазона неопределенности соответствующих оценок от $2 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [Soloviev, 2002] до $200 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [Kvenvolden, 1988] и согласуется с современными оценками суммарных запасов метана $(10 \div 50) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [Milkov, 2004] в гидратах. В связи с тем, что толщина зоны стабильности гидратов в отдельных регионах может превосходить 1500 м (в то время как толщина расчетного слоя в [Денисов и др., 2011] ограничивалась 830 м), а также в связи с неучетом глубоководных залежей гидратов полученная оценка, возможно, несколько занижена.

На рис. 7.4.1а, б приведены изменения толщины зоны стабильности океанических гидратов к 2100 г. по сравнению с 2001 г. с использованием модельных расчетов при антропогенном сценарии SRES-A2. Подобные изменения (с характерным уменьшением толщины зоны стабильности до 10 м) соответствуют разложению порядка $3,9 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$ и $64 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$ гидратов с использова-

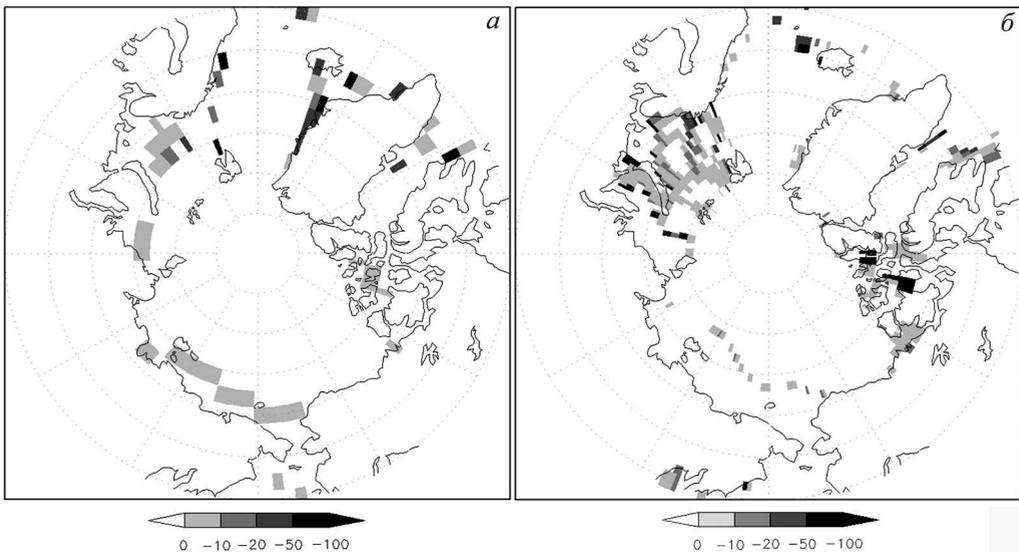


Рис. 7.4.1. Модельные оценки изменений толщины зоны стабильности океанических гидратов в метрах к концу XXI века в высоких широтах северного полушария с использованием расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН (а) и GFDL (б) при сценарии антропогенных воздействий SRES-A2

нием расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL соответственно. При этом выбросы метана со дна океана в XXI веке составляют порядка $6,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$ (35 ГтС) и $10,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$ (60 ГтС) метана на основе расчетов изменений климата с моделями ИВМ РАН и GFDL соответственно (или в среднем 350 МтС/год и 600 МтС/год). Дестабилизация океанических гидратов происходит в основном в высоких широтах северного полушария.

Полученные оценки (в среднем 350–600 МтС/год) по величине находятся в одном диапазоне с оценками суммы всех (антропогенных и естественных) современных потоков метана в атмосферу [Climate Change, 2013]. Следует при этом отметить, что представленные оценки выбросов метана относятся к нижней границе океана, и значительная часть этих выбросов метана будет растворена в воде или переработана бактериями. Кроме того, сокращение зоны стабильности происходит в связи со смещением ее верхней границы в регионах с глубиной моря от 200 до 1500 м (в зависимости от придонной температуры). В связи с миграцией метана, образованного в более глубоких слоях, гидраты максимально заполняют поровое пространство осадков вблизи нижней границы зоны стабильности, а вблизи дна обычно практически отсутствуют [Buffet, 2000]. Адекватный учет подобных эффектов может уменьшить оцениваемые выбросы. Возможны выбросы метана, связанные с появлением выходов на поверхность для пузырьков газа, запертых под слоем метангидратов, в связи с их диссоциацией. Стабильность гидратов связана также с изменениями уровня моря, которые при изменениях климата в XXI веке сравнительно малы [Buffet and Archer, 2004].

Возможны залежи гидратов на мелководном арктическом шельфе, которые могут существовать при наличии субаквальной реликтовой криолитозоны, сохранившейся после последней трансгрессии. Современная придонная температура на арктическом шельфе близка к 0°C , и при глубине шельфа до 200 м гидраты должны быть термодинамически неустойчивы. Однако они обнаруживаются в экспедиционных исследованиях на арктическом шельфе [Милков, 2004, Сергиенко и др., 2012]. Зона стабильности гидратов на мелководном арктическом шельфе определяется наличием здесь шельфовой субаквальной криолитозоны, существование которой в условиях современного климата связывается с промерзанием толщи донных отложений шельфа при регрессии океана в период последнего ледникового цикла [Romanovskii and Hubberten, 2001]. Характеристики этого промерзания и последующей деградации мерзлого слоя в голоцене в настоящее время известны плохо, однако динамика смещения границ слоев мерзлоты и метангидратов в донных отложениях по модельным оценкам в XXI веке может в значительной мере определяться антропогенной нагрузкой на климат [Елисеев и др. 2015].

Список использованной литературы

1. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф. и др. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
2. Голицын Г. С., Гинзбург А. С. Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн лет назад // Доклады АН. 2007. Т. 413. № 6. С. 816–816.

3. Денисов С. Н., Аржанов М. М., Елисеев А. В., Мохов И. И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2011. Т. 441. № 5. С. 685–688.

4. Елисеев А. В., Малахова В. В., Аржанов М. М., Голубева Е. Н., Денисов С. Н., Мохов И. И. Изменение границ многолетнемерзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на Арктическом шельфе Евразии в 1950–2100 гг. // ДАН. 2015. Т. 465. № 5. С. 598–603.

5. Мохов И. И., Безверхний В. А., Карпенко А. А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов в атмосфере и температурного режима по палеореконструкциям для антарктической станции Восток // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.

6. Мохов И. И., Безверхний В. А., Карпенко А. А. Взаимные изменения температурного режима и содержания парниковых газов в атмосфере по палеореконструкциям для последних 800 тысяч лет / В: Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. Отв. ред. А. О. Глико. — М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 312–319.

7. 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 // Доклады АН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.

8. Buffett B. A. Clathrate hydrates // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. № 1. P. 477–507.

9. Buffett B., Archer D. Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 227. № 3. P. 185–199.

10. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J. T. Houghton et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2001. 881 pp.

11. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2013. 1535 pp.

12. Dickens G. R., O'Neil J. R., Rea D. K., Owen R. M. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene // Paleoclimatology. 1995. V. 10. P. 965–971.

13. Holbrook W. S., Hoskins H., Wood W. T., Stephen R. A., Lizaralde D. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling // Science. 1996. V. 273. № 5283. P. 1840–1843.

14. Kvenvolden K. A. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // Chem. Geol. 1988. V. 71. № 1–3. P. 41–51.

15. Milkov A. V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? // Earth-Sci. Rev. 2004. V. 66. № 3. P. 183–197.

16. O'Connor F. M., Boucher O., Gedney N., et al. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review // Rev. Geophys. 2010. V. 48. RG4005. DOI: 10.1029/2010RG000326.

17. Reagan M. T., Moridis G. J. Dynamic response of oceanic hydrate deposits to ocean temperature change // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C12023. DOI: 10.1029/2008JC004938.

18. Renssen H., Beets C. J., Fichefet T., Goosse H., Kroon D. Modeling the climate response to a massive methane release from gas hydrates // Paleoclimatology. 2004. V. 9. PA2010.

19. Romanovskii N. N., Hubberten H.-W. Results of Permafrost Modelling of the Lowlands and Shelf of the Laptev Sea Region, Russia // Permafrost Periglac. Proc. 2001. V. 12. P. 191–202.

20. Soloviev V. A. Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations // Russ. Geol. Geophys. 2002. № 7. V. 43. P. 648–661.