

УДК 551.510

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАНГИДРАТОВ В СИСТЕМЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

© 2013 г. С. Н. Денисов, М. М. Аржанов, А. В. Елисеев,
член-корреспондент РАН И. И. Мохов

Поступило 02.10.2012 г.

DOI: 10.7868/S0869565213080197

Метангидраты широко распространены в областях вечной мерзлоты и донных осадочных породах океана. Суммарные запасы углерода в гидратах оцениваются в 10^4 Гт С [1] – на порядок больше, чем его содержание в атмосфере [2]. Значительные запасы метана находятся также в гидратных залежах в донных отложениях крупнейших внутренних водоемов, таких как озеро Байкал и Каспийское море. В представленной работе сделаны оценки современных запасов гидратов в донных отложениях озера Байкал, их стабильности и выбросов метана при диссоциации метангидратов в результате потепления.

Рост температуры воды при глобальном потеплении способствует дестабилизации и диссоциации скоплений субаквальных гидратов и выбросу потенциально большого количества метана в атмосферу. Подобные выбросы могут иметь значительные глобальные и региональные климатические последствия с ускорением диссоциации гидратов. Разложение метангидратов могло быть причиной быстрых климатических изменений в прошлом [3–5]. Значительные скачки температуры во время последнего ледникового периода, возможно, также связаны с резкими выбросами метана из метангидратов [6].

Стабильность гидратов в донных отложениях внутренних водоемов зависит от температуры и давления. В местах нахождения метангидратов гидростатическое давление у дна превышает давление, необходимое для стабильности гидратов при температуре придонной воды. Образование гидратов выше дна обычно не происходит из-за недостаточной концентрации метана. С увеличением глубины ниже дна гидростатическое давление и температура растут линейно (в равновесных

условиях), а давление, необходимое для стабильности метангидратов, экспоненциально зависит от температуры. В связи с этим существует и нижняя граница зоны стабильности. Рост придонной температуры воды приводит к изменению профиля температуры в донных отложениях и соответствующему сдвигу границ зоны стабильности.

Придонная температура воды в Байкале в настоящее время составляет около 3.5°C при глубине более 200 м [7]. При геотермальном градиенте, равном $0.08^\circ\text{C}/\text{м}$ (что находится в пределах $0.06–0.1^\circ\text{C}/\text{м}$, характерных для Байкала [8]), в донных отложениях в настоящее время должна существовать зона стабильности гидратов (ЗСГ) при глубине более ~ 380 м. При этом толщина ЗСГ возрастает от ~ 20 м при глубине 400 м до 180 м при глубине 1600 м. Считая пористость донных отложений равной 0.4 [8], с использованием данных для площади изобат Байкала [9] можно аналогично [10] оценить современный объем запасов гидратов – около 52 км^3 , метана при стандартных условиях – $7 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ (4 Гт С).

При повышении придонной температуры на 1°C следует ожидать сокращения толщины ЗСГ на всех глубинах в среднем примерно на 15 м, а площади ее распространения – примерно на 5%. Это приводит к сокращению запасов метана в гидратах на 14% – до $6 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ (3.5 Гт С). Оценка количества выделяющегося при этом метана (~ 0.5 Гт С) соответствует суммарной эмиссии метана в атмосферу всеми антропогенными и природными источниками за год [11]. Однако разрушение гидратов соответствует распространению тепловой волны в донных осадках и происходит довольно медленно.

Для оценки интервалов времени, необходимых для разрушения гидратов, были проведены численные эксперименты с использованием метода расчета запасов метана в донных газогидратных залежах аналогично [10]. В качестве началь-

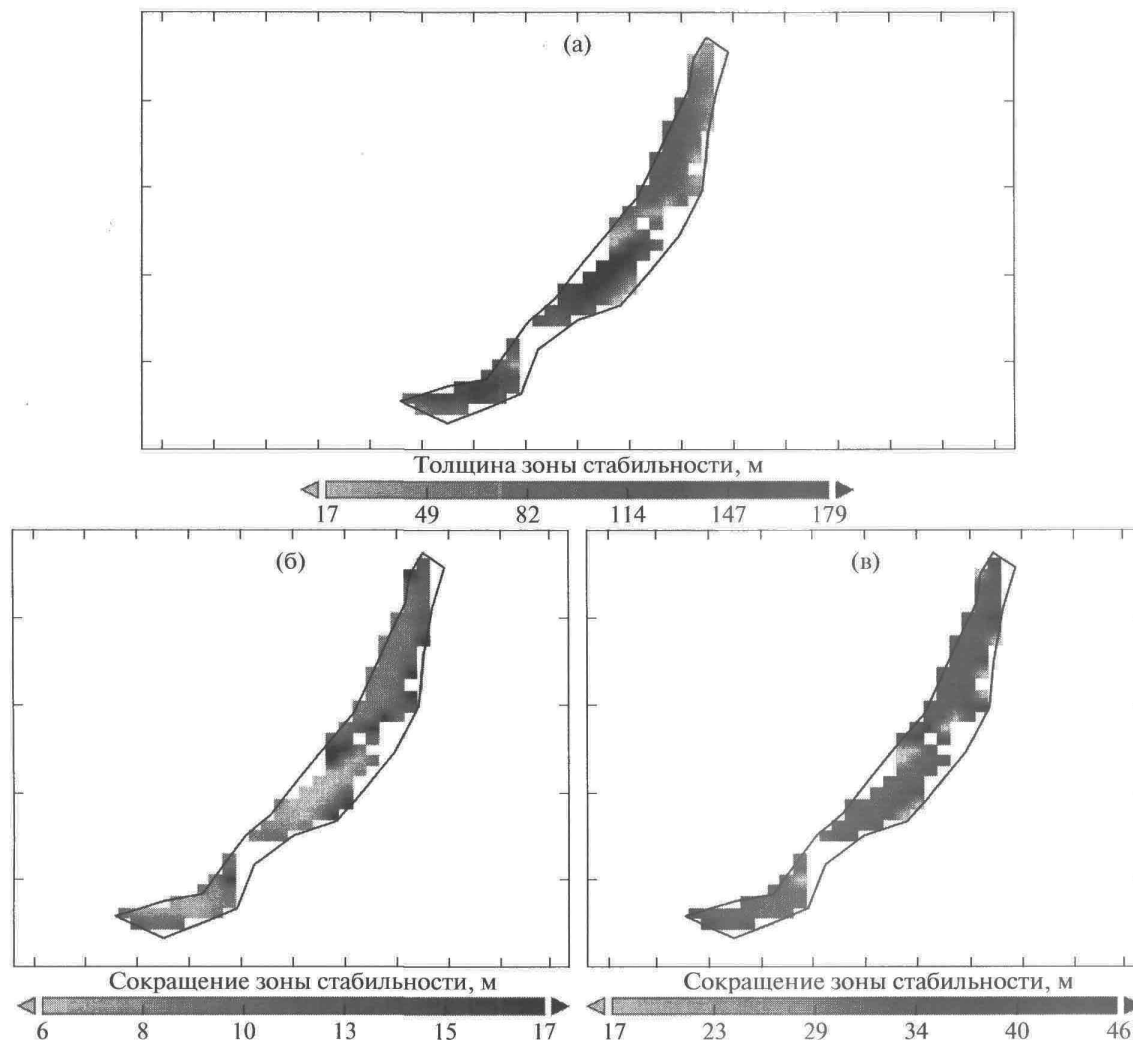


Рис. 1. Рассчитанная толщина зоны стабильности гидратов озера Байкал в современных условиях (а) и ее возможное сокращение при увеличении придонной температуры на 1°C (б) и на 3°C (в).

ных условий для модели донных отложений задавался градиент температуры, соответствующий равновесному состоянию при характерном для глубоководной части Байкала геотермальном потоке 0.09 Вт/м^2 [12] теплопроводности донных отложений согласно [12] и современной придонной температуре воды согласно профилю [7]. Были проведены расчеты толщины ЗСГ для периода 15000 лет при температуре, повышенной на 1°C (численный эксперимент E1) и 3°C (эксперимент E2) относительно современной придонной температуры в качестве верхнего граничного условия. Значения кондуктивного теплового потока в Байкальской впадине изменяются в достаточно широких пределах от 0.05 до 0.12 Вт/м^2 [12].

В связи с этим для оценки чувствительности модели были проведены соответствующие расчеты с геотермальным потоком 0.07 Вт/м^2 (эксперименты E1_C и E2_C), характерным для центральной части Байкальской впадины [13].

По модельным расчетам запасы метана в газогидратных залежах Байкала в экспериментах E1 и E2 составляют порядка 60 км^3 гидратов или более 8 тыс. км^3 метана при стандартных условиях (около 5 Гт C). Отличие этих оценок от полученных выше связано с учетом в модели градиента температуры в водной толще, небольшой разницей между рассчитанным и заданным значениями геотермального градиента и пространственным разрешением (модельные расчеты сделаны при

широтно-долготном разрешении $0.25^\circ \times 0.125^\circ$). Для современных условий толщина ЗСГ по расчетам находится в диапазоне от 20 до 180 м в зависимости от глубины озера (рис. 1).

В численном эксперименте E1 толщина ЗСГ сокращается к концу расчетного периода в зависимости от глубины на 6–17 м, в эксперименте E2 — на 17–46 м. При этом запасы гидратов сокращаются соответственно на 8% (до 55 км^3) и на 32% (до 40 км^3) с выделением метана в количестве около 0.4 и 1.6 Гт С соответственно.

Рисунок 2 характеризует динамику сокращения ЗСГ по модельным расчетам. Более половины выбросов метана в обоих экспериментах происходит в первую тысячу лет. Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет для всей системы озера Байкал около $0.35 \text{ Мт } \text{CH}_4/\text{год}$ и $1.1 \text{ Мт } \text{CH}_4/\text{год}$ для экспериментов E1 и E2 соответственно. При этом соответствующие средние потоки, приходящиеся на единицу площади поверхности Байкала, около 10 и $32 \text{ г } \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что сопоставимо с потоками метана из болот Западной Сибири [14, 15] и более чем на порядок превосходит потоки метана из-за разрушения гидратов в результате седиментации в Байкале ($0.2\text{--}0.9 \text{ г } \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [8]). Далее скорость деградации ЗСГ постепенно уменьшается, через 1.7 и 6 тысяч лет для экспериментов E1 и E2 достигается новое равновесное состояние.

В экспериментах E1_C и E2_C современные запасы метана составляют порядка 78 км^3 гидратов (на 30% больше, чем в экспериментах E1 и E2) или более 10 тыс. км^3 метана при стандартных условиях (около 6 Гт С). Запасы гидратов в экспериментах E1_C и E2_C к концу расчетного периода сокращаются (аналогично E1 и E2) соответственно на 8% (до 72 км^3) и на 33% (до 52 км^3). Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет в этих экспериментах по сравнению с экспериментами E1 и E2 несколько выше и составляет около 0.42 и $1.26 \text{ Мт } \text{CH}_4/\text{год}$ для экспериментов E1_C и E2_C соответственно. При этом новое равновесное состояние достигается несколько позже — через 2 и 7.5 тысяч модельных лет. Полученные изменения соответствуют чувствительности объема запасов газогидратов в Байкале к геотермальному потоку тепла около $-1 \text{ км}^3/(\text{мВт}/\text{м}^2)$ (1.5% уменьшения запасов на 1% увеличения геотермального потока).

Следует отметить, что при сокращении зоны стабильности в основном снизу значительная часть метана не может достичь дна, так как для этого он должен пройти через зону стабильности гидратов. Кроме того, большая часть достигшего

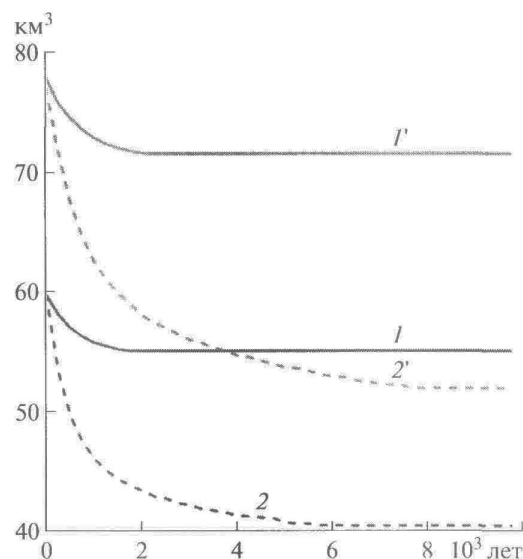


Рис. 2. Изменение запасов метангидратов в системе озера Байкал по расчетам при увеличении придонной температуры на 1°C (I, I') и на 3°C (2, 2') для экспериментов E1 и E2 (I, 2) и для экспериментов E1_C и E2_C (I', 2).

дна метана растворяется в воде и не попадает в атмосферу. Однако в Байкале обнаружено множество точек выброса метана, в том числе и в глубоководных частях с высотой факела до 950 м от дна [8], что говорит о большом потоке метана с нижних слоев донных отложений и его высокой концентрации вблизи дна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, программ РАН (74_ОК/11-4), Министерства образования и науки РФ (ГК 11.519.11.5004, 16.525.11.5013, 21.519.11.5004 и 11.519.11.5006) и гранта Президента РФ НШ-5467.2012.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kvenvolden K.A. // Chem. Geol. 1988. V. 71. P. 41–51.
2. 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, Y. Ding, D.J. Griggs, et al. Eds. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.
3. Dickens G.R., O'Neil J.R., Rea D.K., Owen R.M. // Paleoceanography. 1995. V. 10. P. 965–971.
4. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.
5. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. // ДАН. 2007. Т. 413. № 6. С. 816–819.
6. Renssen H., Beets C.J., Fichefet T., et al. // Paleoceanography. 2004. V. 9. PA2010.

7. Шимараев М.Н., Гнатовский М.Ю., Блинов В.В., Иванов В.Г. // ДАН. 2011. Т. 438. № 1. С. 121–124.
8. Granin N.G., Myukshin S.I., Makarov M.M., et al. // Geo-Mar. Lett. 2012.
9. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М. и др. // ДАН. 2006. Т. 408. № 1. С. 102–107.
10. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. // ДАН. 2011. Т. 441. № 5. С. 685–688.
11. Lelieveld J., Crutzen P.J., Dentener F.J. // Tellus. 1998. V. 50B. № 2. P. 128–150.
12. Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R., Khanukaev S.B. // Intern. J. Earth Sci. 2000. V. 89. № 2. P. 193–211.
13. Голубев В.А. // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 684–688.
14. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. // Метеорология и гидрология. 2010. № 2. С. 55–62.
15. Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M.V., et al. // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. № 3. 035201.