

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕСТАБИЛИЗАЦИЮ ВНУТРИМЕРЗЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

Давлетшина Динара Анваровна¹, **Чувиллин Евгений Михайлович**¹, **Екимова
Валентина Васильевна**¹, **Буханов Борис Александрович**¹, **Шахова Наталья
Евгеньевна**^{2,3}, **Семилетов Игорь Петрович**^{2,3,4}

¹ – Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
Россия

³ – Аляскинский университет в Фэрбенксе, Фэрбанкс, Аляска, США

⁴ – Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного
отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

На сегодняшний день одной из наиболее серьезных экологических проблем является существенное увеличение концентрации парниковых газов (прежде всего метана) в арктических регионах, что многими исследователями рассматривается как существенный фактор глобальных изменений климата. В результате повышения температуры окружающей среды могут активизироваться процессы деградации многолетнемерзлых пород как на суше, так и на арктическом шельфе, что приводит к дестабилизации газогидратных образований и высвобождению огромных объемов метана в атмосферу [1-4]. Для понимания механизма разложения внутримерзлотных газогидратов важное значение имеет экспериментальное моделирование этих процессов.

Для экспериментального моделирования влияния температуры на диссоциацию газовых гидратов в мерзлых породах в работе использовалась специальная экспериментальная установка, позволяющая моделировать необходимые термобарические условия в образцах грунта в широком диапазоне температур и давлений. Установка представляет собой металлическую барокамеру (объемом около 420 см³), в которую помещается контейнер с приготовленным грунтом. Датчики температуры и давления позволяют автоматически регистрировать (с точностью 0.05°C и 0.005 МПа) изменения термобарических условий в образце, которые записываются на компьютер со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [5]. В качестве объектов исследования для моделирования использовались песчаные и супесчаные грунты нарушенного сложения, в том числе отобранные на арктическом шельфе. Гидратонасыщение грунтовых образцов осуществлялось при отрицательной температуре ($\approx -6^\circ\text{C}$) под давлением чистого метана (4 - 6 МПа) [5]. В дальнейшем насыщенные гидратом метана замороженные образцы грунтов, при фиксированной отрицательной температуре -6°C , переводились в условия самоконсервации порового гидрата. Для этого давление в барокамере сбрасывалось до 0.6 - 1.6 МПа. При таких условиях наблюдалось разложение поровых газовых гидратов, которое, вследствие проявления эффекта самоконсервации, носило затухающий характер [6]. Давление газа в барокамере в ходе эксперимента по диссоциации газогидратов в мерзлых породах поддерживалось постоянным. После затухания процесса диссоциации порового гидрата (его самоконсервация), температуру в барокамере с мерзлым гидратосодержащим образцом постепенно повышали до положительного значения, при этом наблюдали за динамикой изменения давления и температуры внутри барокамеры и

фиксируют критические значения температур, при которых происходило резкое изменение давления, связанное с активизацией процесса разложения поровых гидратов. Характеристики экспериментальных образцов, а также параметры их гидратосодержания в условиях самоконсервации (гидратонасыщенность (Sh) и коэффициент гидратности (Kh), характеризующий долю поровой влаги перешедшая в гидрат, приведены в таблице 1. Здесь также даны условия нагревания и температуры начала интенсивного разложения порового гидрата (t_d).

Таблица 1. Параметры гидратосодержания мерзлых гидратонасыщенных образцов

Образец	Влажность, %	Плотность, г/см ³	Засоленность, %	Параметры гидратосодержания образцов в условиях самоконсервации			Условия нагревания		Температура начала интенсивного разложения порового гидрата (t_d), °C
				Sh , %	Kh , д.ед.	Ksc , %	$T_{нач.}$, °C	$T_{кон.}$, °C	
Песок	14	1.80	0.4	4.0	0.05	8.5	-4	1.0	-1.3
Супесь	15	1.82	0.1	6.9	0.05	26	-3	0.3	-0.3
Суглинок	18	1.20	0.7	7.0	0.17	61	-10	2.5	-2.7

Исследуемые образцы имели влажность 14-18%, их засоленность менялась от 0.1 до 0.7%. В условиях самоконсервации образцы характеризовались гидратонасыщенностью (Sh) до 7%, а доля влаги, перешедшая в гидрат (Kh), достигала 17%. Расчет коэффициента самоконсервации (Ksc) показал, что наибольшая сохранность гидрата метана наблюдалась в образце суглинка (61% от первоначального значения в равновесных условиях), а наименьшая в песке (8.5%).

Динамику изменения термобарических условий в мерзлом гидратосодержащем образце при нагревании можно проследить на примере экспериментов в песчаном грунте (рис. 1).

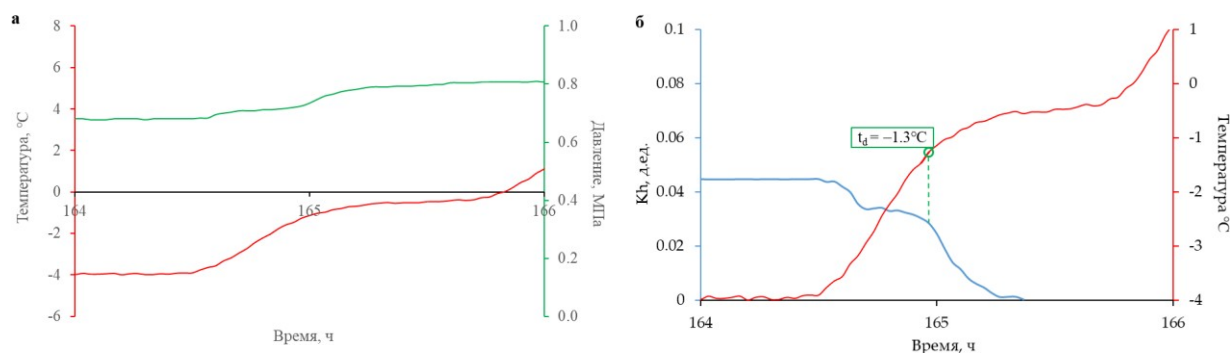


Рисунок 1. Динамика изменения температуры, давления (а) и коэффициента гидратности (Kh) (б) в образце мерзлого гидратосодержащего песка при повышении температуры с указанием температуры начала интенсивного разложения порового гидрата (t_d).

Анализ изменения температуры и давления во времени при нагревании данного мерзлого гидратонасыщенного образца показал, что в начале при повышении температуры давление в барокамере увеличивается незначительно вследствие расширения газа (на 0.02 – 0.03 МПа), в дальнейшем при температуре -1.3°C отмечается резкое увеличение газового давления за счет диссоциации порового гидрата метана. При пересчете этого давления на Kh фиксируется резкое уменьшение гидратосодержания при данной температуре.

Анализ температуры начала интенсивного разложения порового гидрата в исследуемых грунтах (табл. 1) показывает, что ее величина меняется от -0.3°C до -2.7°C и находится в диапазоне отрицательных температур ниже точки фазовых переходов поровый лед-вода (температура оттаивания) в данных образцах. Температура начала интенсивного разложения порового гидрата (t_d) зависит от состава мерзлой породы, прежде всего от ее засоленности. Так, наиболее высокая величина t_d зафиксирована в образце незасоленной супеси (-0.3°C) (табл. 1). С повышением засоленности в ряду супесь-песок-суглинков величина t_d смещается в область более низких температур (рис. 2). Полученные данные свидетельствуют, что в засоленных и глинистых грунтах температура разложения порового гидрата в метастабильном состоянии будет значительно ниже, чем в менее дисперсных и менее засоленных грунтах.

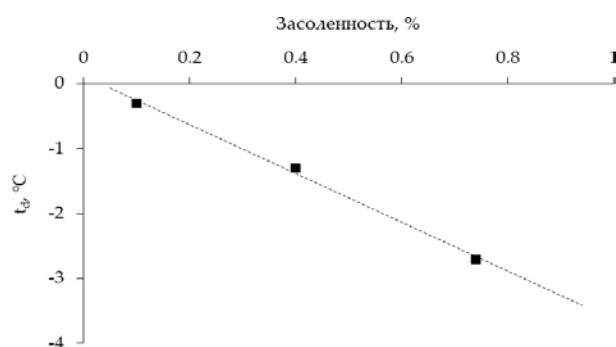


Рисунок 2. Изменение температуры начала интенсивного разложения порового гидрата (t_d) в мерзлых гидратосодержащих образцах в зависимости от засоленности.

Результаты экспериментального моделирования по исследованию влияния повышения температуры на поведение газогидратных образований в мерзлых породах позволяют говорить о важной роли температурных условий на существование метастабильных газогидратных образований в толщах мерзлых пород на арктическом шельфе.

Основываясь на существующих литературных данных и результатах, полученных в ходе экспериментальных исследований, можно следующим образом схематично представить основные стадии развития субаквальной криолитозоны, содержащую реликтовые газогидраты, при постепенном повышении температуры мерзлой толщи (рис. 3).

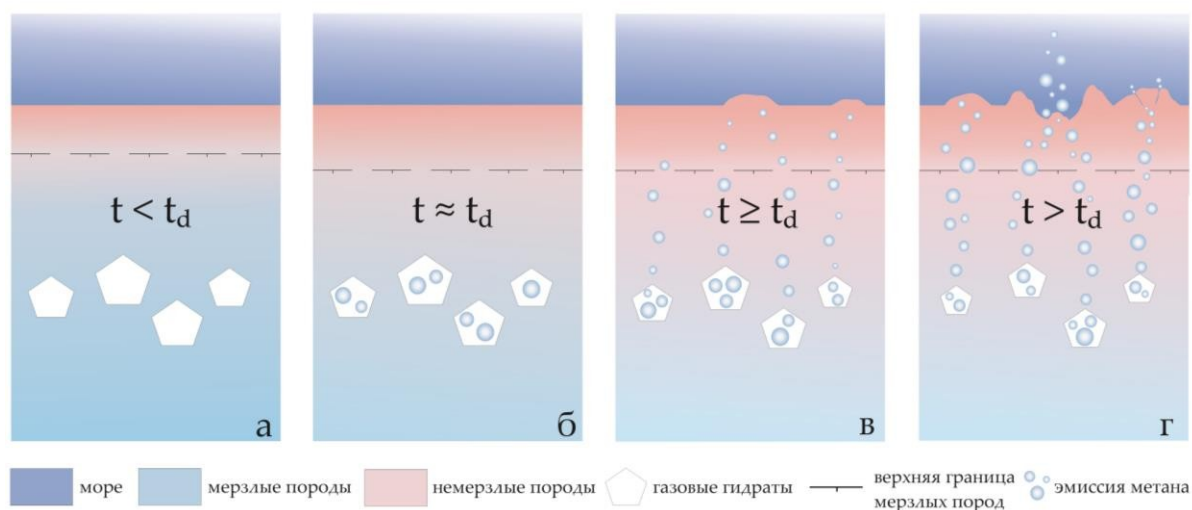


Рисунок 3. Схема эволюции субаквальной криолитозоны, содержащей реликтовые газогидраты, при постепенном повышении температуры мерзлой толщи [7].

При постепенном повышении температуры пород на начальном этапе трансгрессии моря в процессе взаимодействия морской воды с мерзлой толщей внутримерзлотные газогидратные образования остаются в метастабильном состоянии, если температура не превышает некоторое критическое значение (t_d) (рис. 3а). При достижении температуры пород критического значения газовые гидраты начинают диссоциировать (рис. 3б). При температуре равной или немного превышающей критическую происходит активное разложение газогидратных скоплений, а высвободившийся метан начинает мигрировать к поверхности морского дна, с возможным образованием характерных форм рельефа (рис. 3в). При значительном превышении критической температуры интенсивное разложение газовых гидратов может сопровождаться мощными газовыми выбросами и формированием пузырьковых потоков метана, которые хорошо фиксируются в водной толще. При этом на морском дне могут образовываться специфические структуры (покмарки, воронки и т.д.) (рис. 3г).

Таким образом, экспериментальное моделирование показало, что активная диссоциация внутримерзлотных газогидратов происходит при достижении некоторой критической температуры (ниже температуры таяния порового льда), зависящей от состава и засоленности мерзлых пород. В ходе экспериментов было выявлено, что критическая температура разложения реликтовых газогидратов в мерзлых породах может изменяться в широком диапазоне отрицательных температур ($-3.0 \dots -0.3^\circ\text{C}$). Учитывая, что при деградации субаквальной криолитозоны в мерзлой толще формируется практически безградиентное поле, даже незначительное повышение температуры может привести к активизации объемного разложения внутримерзлотных гидратов, которое может сопровождаться мощными газовыми выбросами и формированием пузырьковых потоков метана из донных отложений.

Литература

1. Ruppel, C. D.; Kessler, J. D. The interaction of climate change and methane hydrates. *Rev. Geophys.*, 2017, 55(1), pp. 126-168. <https://doi.org/10.1002/2016RG000534>
2. Dean, J. F.; Middelburg, J. J.; Röckmann, T.; Aerts, R.; Blauw, L. G.; Egger, M.; Jetten, M. S. M.; de Jong, A. E. E.; Meisel, O. H.; Rasigraf, O.; et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Rev. Geophys.*, 2018, 56(1), pp. 207-250. <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
3. Shakhova, N.; Semiletov, I.; Chuvilin, E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*, 2019, 9(6), 251. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060251>
4. Thornton, B.F.; Geibel, M.C.; Crill, P.M.; Humborg, C.; Mörrth, C.M. Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, 43(11), pp. 5869-5877. <https://doi.org/10.1002/2016GL068977>
5. Чувилин, Е. М.; Давлетшина, Д. А.; Лупачик, М. В. Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах. *Криосфера Земли*, 2019, т. 23, № 2, с. 50–61
6. Chuvilin, E.; Bukhanov, B.; Davletshina, D.; Grebenkin, S.; Istomin, V. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost. *Geosciences* 2018, 8,12. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120431>
7. Chuvilin, E.; Davletshina, D.; Ekimova, V.; Bukhanov, B.; Shakhova, N.; Semiletov, I. Role of warming in destabilization of intra permafrost gas hydrates in the Arctic shelf: experimental modeling. *Geosciences* 2019, 9, 407