

## ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗОГИДРАТНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ЗОНАХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ

© 2019 г. А. Л. Собисевич, Е. И. Суетнова, Р. А. Жостков\*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

*123242 Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1*

*\*e-mail: shageraxcom@yandex.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

В статье рассмотрены процессы эволюции газогидратных скоплений, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам. Представлены математическая модель и результаты численного моделирования аккумуляции газовых гидратов в морском дне в глубинных структурах подводных грязевых вулканов. Количественно проанализировано влияние глубины питающего резервуара и давления в нем на эволюцию газогидратных скоплений, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам. Моделирование количественно показало, что гидратонасыщенность в зонах подводных грязевых вулканов непостоянна и ее эволюция зависит от геофизических свойств среды дна (градиент температуры, пористость, проницаемость, физические свойства осадков) и глубины питающего резервуара и давления в нем, при этом скорость гидратонакопления в десятки и сотни раз превышает скорость гидратонакопления в осадочных бассейнах пассивных континентальных окраин.

**Ключевые слова:** газовые гидраты, глубоководные грязевые вулканы, математическое моделирование.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019245-51>

### ВВЕДЕНИЕ

Подводные грязевые вулканы широко распространены на морском дне – по современным оценкам их может быть более 100 (включая уже обнаруженные) [Milkov et al., 2003; Mazzini, 2009; Mazzini, Etiope, 2017; Каевицер и др., 2016]. Активность грязевых вулканов является мощным источником разгрузки коровых флюидов и газов к поверхности [Milkov et al., 2003; Mazzini, 2009; Mazzini, Etiope, 2017; Каевицер и др., 2016; Tinivella, Giustiniani, 2012]. Низкотемпературный характер их активности и высокое давление на морском дне создают предпосылки для формирования газовых гидратов в придонных зонах подводного грязевого вулканизма. Изотопный анализ грязевулканических флюидов и газов при геофизических исследованиях морского дна дополняет эти предпосылки. Газовые гидраты – это кристаллические структуры, состоящие из молекул газа и воды, стабильные при определенных термобарических условиях (высокие давления и низкие температуры) [Sloan, Koh, 2007]. Геофизическими исследованиями морского дна в зонах грязевых вулканов были обнаружены как газовые гидраты, так и геохимические признаки их присутствия в морском дне в зонах разгрузки коровых флюидов в окрестностях

подводных грязевых вулканов. Прямое обнаружение локальных скоплений газовых гидратов и их признаков в ряде зон грязевых вулканов на дне акваторий показывает, что в этих районах выполняются необходимые условия накопления и стабильности газовых гидратов, то есть температура и давление лежат в интервале термобарической стабильности газовых гидратов и присутствует необходимое количество газа для поддержания термобарического равновесия с коровым флюидом [Sloan, 1998]. Проведенные на основании наблюдений на поверхности дна оценки предполагают, что гидратонасыщенность морского дна в интервале РТ стабильности газовых гидратов, ассоциированная с грязевым вулканизмом, оказывается около 25% [Milkov et al., 2003; Ginsburg, Soloviev, 1997]. При этом оценки строились на экстраполяции поверхностных значений на глубину и не рассматривалась возможная эволюция гидратных скоплений, обусловленная процессами грязевого вулканизма [Feseker et al., 2014], влияющего на геофизические условия в морском дне в зонах грязевого вулканизма. Так как субаквальные грязевые вулканы и приуроченные к ним скопления газовых гидратов имеют важное значение для изучения проблем геологических опасностей, изменения

климата, оценок процессов дегазации Земли и т.п., то актуально построение не только качественных, но и количественных моделей образования и эволюции газовых гидратов в зонах глубоководных грязевых вулканов. В данной работе представлены математическая модель процесса аккумуляции газовых гидратов, приуроченных к подводным грязевым вулканам и результаты модельных расчетов скоростей накопления газовых гидратов и их эволюции для ряда различных возможных значений геофизических параметров реализации грязевого вулканизма.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель аккумуляции газовых гидратов, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам, основывается на представлениях о фильтрации газонасыщенных флюидов через зону термобарической стабильности газовых гидратов в морском дне [Суетнова, 2011, 2016; Жостков и др., 2017] и на информации о фильтрации к поверхности дна газонасыщенных флюидов в зонах грязевого вулканизма [Milkov et al., 2003]. Площадь связанной с грязевым вулканом области разгрузки газов и флюидов может занимать до нескольких десятков квадратных километров дна акватории [Milkov et al., 2003; Tinivella, Giustiniani, 2012]. Для окрестности подводных грязевых вулканов при достаточной глубине моря зона стабильности газовых гидратов расположена на некотором расстоянии от центра вулкана, которое зависит от температуры в его центре. В жерле вулкана интервал термобарической стабильности может выклиниваться, в зависимости от внешних условий, несмотря на низкотемпературный характер активности грязевых вулканов [Sloan, Koh, 2007]. Измерений температуры и оценок теплового потока в ближней окрестности подводных грязевых вулканов очень мало в силу технической сложности [Ginsburg et al., 1999; Perez-Garcia et al., 2009]. Однако по имеющимся наблюдениям можно принять, что на расстоянии порядка 100 м от центральной зоны грязевого вулкана температурные возмущения, связанные с каналом вулкана, затухают и тепловой поток близок к фоновым значениям [Ginsburg et al., 1999; Perez-Garcia et al., 2009] для окрестности подводных грязевых вулканов. Работы по исследованиям влияния извержений грязевых вулканов на структуру морского дна [Feseker et al., 2014] показывают, что извержения могут приводить к реструктуризации пор в слое осадков, и процесс фильтрации вероятно начинается заново. Из современных представлений о грязевых вулканах следует, что зона их питания расположена в глубине осадков и пред-

ставляет собой линзовидное тело, сложенное глинами (реже – песками), разжиженными го-могенизированными газоводными флюидами (водой, нефтью, газами разного состава), часто с большим количеством твердых обломков вмещающих пород, в котором поддерживается аномально высокое давление [Mazzini, Etiope, 2017; Холодов, 2012]. Учитывая данные геофизических наблюдений, можно предположить, что помимо собственно вулканической активности в центре вулкана, в вулканическом канале, на периферии вулкана происходит фильтрация к поверхности газонасыщенного флюида (высачивание) в осадках над протяженным осадочным слоем с аномальным высоким поровым давлением, находящимся на некоторой глубине осадков и являющимся источником грязевулканической деятельности (питающим резервуаром) [Milkov et al., 2003; Mazzini, 2009; Mazzini, Etiope, 2017]. Газонасыщенный флюид, движимый повышенным давлением флюида в питающем резервуаре, фильтруется сквозь пористый насыщенный проницаемый слой осадков к поверхности. В интервале глубин, где выполняются термобарические условия стабильности газовых гидратов, происходит их аккумуляция по мере доставки в эту зону газа, растворенного в фильтрующемся флюиде. Такая система фильтрации над резервуаром грязевого вулкана может существовать между периодами активизации и извержениями вулкана. При этом можно считать, что фильтрация в пористой среде осадков над резервуаром питания грязевого вулкана оказывает, в силу низкой проницаемости перекрывающего слоя, малосущественное влияние на давление флюида в резервуаре (в котором предполагается аномально высокое поровое давление (АВПД)) [Milkov et al., 2003; Mazzini, 2009; Mazzini, Etiope, 2017; Холодов, 2012) по сравнению с извержениями вулкана.

Предлагаемая математическая модель описывает комплексный процесс аккумуляции газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности из насыщенного газом порового флюида, фильтрующегося в окрестности жерла над резервуаром питания грязевого вулкана с повышенным давлением насыщающих флюидов.

Математическая модель этого комплексного процесса состоит из системы уравнений в частных производных (1–6) [Суетнова, 2016; Жостков и др., 2017] соответствующими граничными условиями:

$$v(z, t) = -\frac{k}{\mu m} \left( \frac{\partial p_f(z, t)}{\partial z} - \rho_f g \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f v(z, t) m}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$m \frac{\partial h(z, t)}{\partial t} = - \frac{\rho_f \nabla (mv(z, t) c_{eq})}{\rho_h c_h}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = m_0 \frac{1}{K} \frac{\partial \rho_f}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho C} \frac{\partial m \cdot V_f \cdot f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (5)$$

Уравнение (1) (уравнение Дарси) описывает фильтрацию поддонного флюида. Уравнения (2) и (3) – это уравнения неразрывности насыщающего флюида и сохранения газа, последнее получено из уравнения сохранения газа при предположении локального термодинамического равновесия гидрат-флюид в порах [Davie et al., 2004; Rempel, Buffett, 1997]. Уравнение (4) замыкает систему, описывая реакцию пористой среды на изменение давления флюида [Чарный, 1963]. В уравнении (5), описывающем тепловой режим, отсутствует член, описывающий источник, обусловленный образованием гидратов, так как в работе [Davie, Buffett, 2001] показано, что накопление гидратов из газа, растворенного в поровом флюиде, не вносит значимых возмущений в профиль температуры в осадках. Здесь использованы обозначения:  $m$  – пористость;  $\rho_f$  – плотность флюида;  $\rho_h$  – плотность гидрата;  $k$  – проницаемость осадков, являющаяся функцией пористости  $k = k_0 m^3$ ;  $m$  – вязкость флюида;  $f$  – температура;  $C$  – теплоемкость;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $K$  – коэффициент сжимаемости пористой среды [Чарный, 1963; Басниев и др., 1993];  $h$  – гидратонасыщенность;  $t$  – время;  $z$  – пространственная координата;  $v_f$  – скорость фильтрации;  $p_f$  – давление флюида;  $c_h$  и  $c_{eq}$  – концентрации газа в гидрате и во флюиде в присутствии гидрата). Для локализации зоны стабильности гидратов в зависимости от давления и температуры использовались известные зависимости, полученные из решений уравнений термодинамики [Tinivella, Giustiniani, 2012; Davie et al., 2004]. Граничные условия: на нижней границе на контакте с резервуаром питания (глубина  $L$ ) давление флюида поддерживается постоянным и равным  $p_L$ , на верхней границе давление равно давлению на дне акватории. Температура на верхней границе поддерживается постоянной и равной 0; на нижней границе задается постоянный градиент

температуры, соответствующий региональному значению в окрестности грязевого вулкана. Для газового гидрата ставится естественное условие равенства нулю содержания гидрата в порах вне границ стабильности. Пористость в начальный момент принимается постоянной  $m(z) = m_0$ ; в начальный момент, при  $t = 0$ , в слое давление флюида гидростатическое  $p_0$ . Система сформулирована в одномерном приближении следуя предположению об однородности потока флюида к поверхности от резервуара питания и отсутствию горизонтальных перетоков [Чарный, 1963].

В данном исследовании для упрощения предполагаем постоянство градиента температуры в модели, т.е. пренебрегаем эффектом прогрева от извержения грязевого вулкана, который потенциально может влиять на положение границы стабильности газовых гидратов. Следует отметить, что, хотя извержения грязевых вулканов являются низкотемпературными, они могут вносить кратковременные возмущения в распределение температур в поверхностном слое осадков в ближней окрестности грязевого канала и их учет в будущем будет требовать дополнительных данных натурных наблюдений.

Сформулированные уравнения описывают нестационарный процесс аккумуляции газовых гидратов в областях разгрузки поровых флюидов в окрестности грязевых вулканов над питающим резервуаром грязевого вулкана в промежутке между извержениями. Предполагается, что границы питающего резервуара вулкана вне зоны жерла проницаемы для ламинарной фильтрации газонасыщенного флюида к поверхности. Сформулированная система уравнений и граничные условия позволяют определить скорости накопления газовых гидратов из растворенного в поровом флюиде газа в окрестности грязевого вулкана.

## РЕШЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

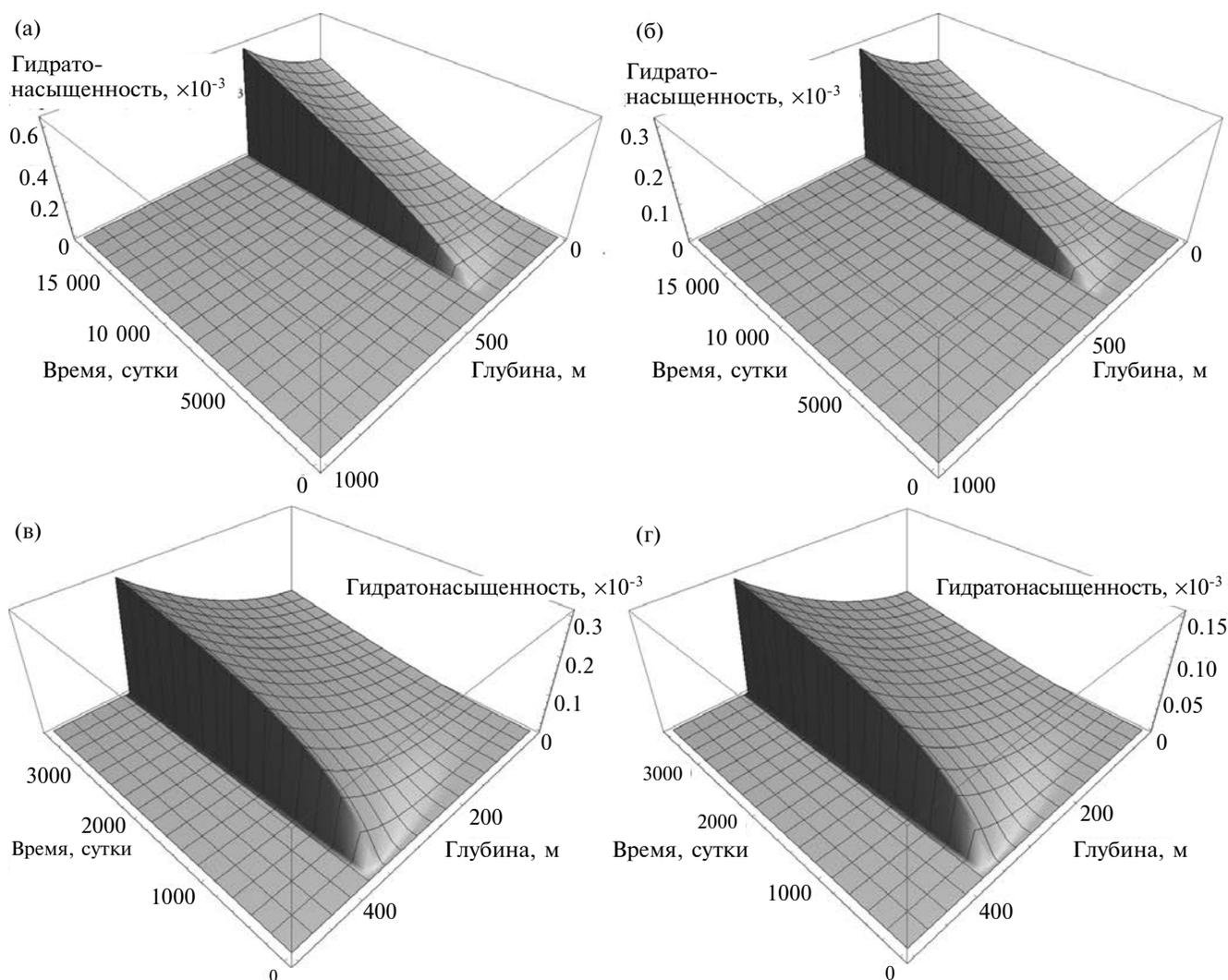
Система уравнений (1–5) решалась численно для различных характерных значений входящих параметров системы. Потенциально, значительное влияние на результаты моделирования могут оказывать различия в величине ключевых параметров осадков (величина коэффициента проницаемости [Суетнова, 2016; Жостков и др., 2017]), и зоны питания (глубина и давление в питающем резервуаре), которые могут значимо варьироваться в естественных условиях. На рис. 1 представлены результаты модельного расчета эволюции гидратонасыщенности в течение 10 или 50 лет с начала процесса фильтрации для значения коэффициента проницаемости  $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$  и мощности слоя осадков над питающим слоем  $L = 500$  или  $1000 \text{ м}$  для внешнего

давления 12 МПа (глубина моря около 1200 м), 83% или 100% литостатического давления в резервуаре питания и расчетной глубины зоны стабильности газовых гидратов 350 м, остальные параметры:  $m_0 = 0.3$ ,  $\mu = 2.6 \times 10^{-3}$  Па·с,  $\rho_f = 1.0 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_s = 2.65 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $K = 10^{10}$ ,  $c_h = 0.12$ , фоновый градиент температуры равен 0.05 К/м [Davie et al., 2004; Rempel, Buffett, 1997; Чарный, 1963; Davie, Buffett, 2001; Николаевский и др., 1970].

Из сравнения результатов моделирования, представленных на рис. 1а, 1б видно, что рост гидратонасыщенности приобретает почти стационарный характер существенно раньше для

меньшей глубины питающего резервуара, чем для большей, что следует из решений системы (1–6) для эволюции скоростей фильтрации для этих случаев.

Анализ результатов моделирования гидратонасыщенности, приведенных на рис. 1, показывает, что уменьшение давления в резервуаре питания приводит к уменьшению гидратонасыщенности как для случая глубины питающего резервуара 500 м, так и для и 1000 м, соответственно, что обусловлено снижением скорости фильтрации в зоне стабильности газовых гидратов при таком изменении граничных условий для системы уравнений (1–6).



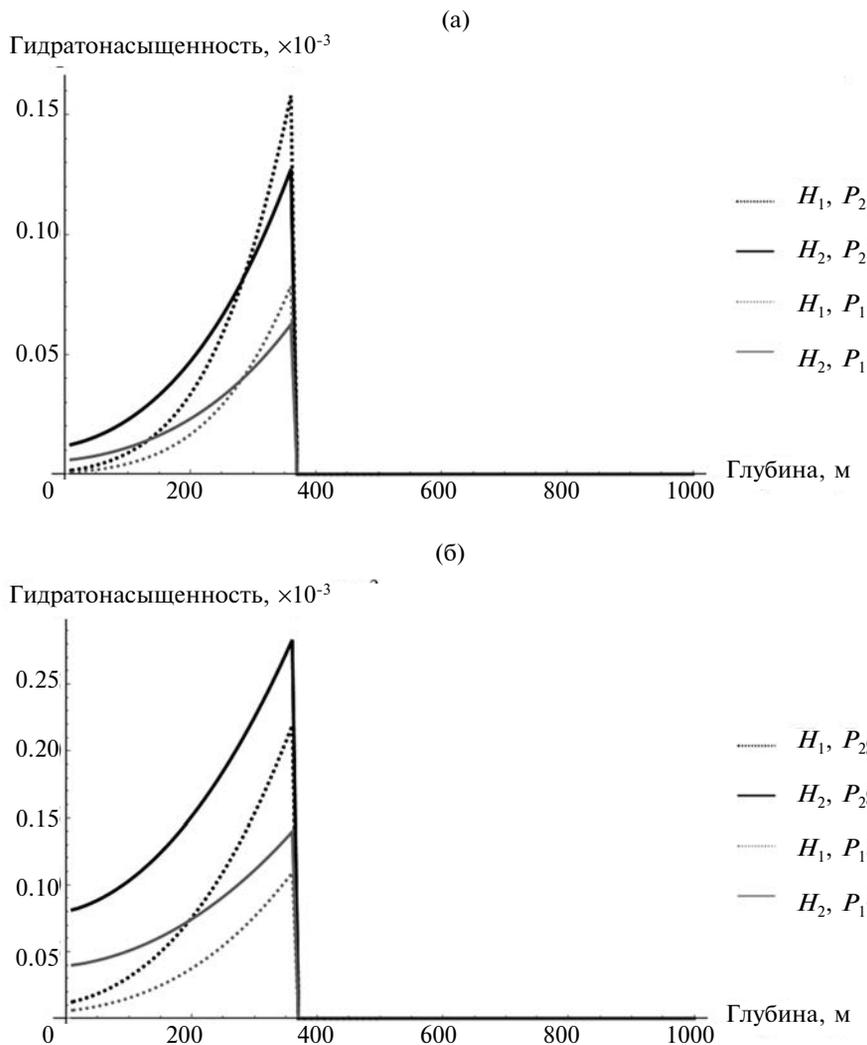
**Рис. 1.** Эволюция гидратонасыщенности.

а – за 50 лет,  $L = 1000$  м, давление в резервуаре литостатическое; б – за 50 лет,  $L = 1000$  м, давление в резервуаре 83% литостатического давления; в – за 10 лет,  $L = 500$  м, давление в резервуаре литостатическое; г – за 10 лет,  $L = 500$  м, давление в резервуаре 83% литостатического давления.

Для сравнения влияния на эволюцию гидратонасыщенности глубины резервуара питания и давления в резервуаре питания ниже приводятся результаты расчетов гидратонасыщенности в разные моменты времени от начала фильтрации (рис. 2).

Сравнение (см. рис. 2) гидратонасыщенности для случаев разных глубин питающего резервуара при условии литостатического давления в них показывает, что гидратонасыщенность при меньшей глубине слоя через 2 года превышает гидратонасыщенность через 10 лет при большей глубине слоя, что определяется более быстрым повышением скорости фильтрации в интервале глубин стабильности газовых гидратов для меньшей глубины питающего ре-

зервуара. Сравнение гидратонасыщенности для случаев меньших давлений в питающих резервуарах показывает такое же соотношение для этих параметров. На больших временах истории гидратонакопления влияние начального периода гидратонакопления нивелируется повышением гидратонасыщенности для варианта большей глубины резервуара питания за счёт постепенного повышения для этого случая скорости фильтрации. Таким образом, скорость фильтрации над резервуаром питания грязевого вулкана определяет скорость накопления приуроченных к нему газовых гидратов, и различия в эволюции скорости фильтрации, связанные с условиями залегания питающего слоя грязевого вулкана и давления в нем, определяют



**Рис. 2.** Распределение гидратонасыщенности по глубине.

$H_1, P_1$  – через 2 года (вверху) и 4 года (внизу),  $L = 500$  м и давления в слое 83% литостатического;  $H_1, P_2$  – через 2 года (вверху) и 4 года (внизу),  $L = 500$  м и литостатического давления в слое;  $H_2, P_1$  – через 10 лет (вверху) и 20 лет (внизу),  $L = 1000$  м и давления в слое 83% литостатического;  $H_2, P_2$  – через 10 лет (вверху) и 20 лет (внизу),  $L = 1000$  м и литостатического давления в слое.

гидратонасыщенность в различные моменты времени. Полученные модельные результаты позволяют объяснить наличие значительных объемов газовых гидратов, ассоциированных с грязевыми вулканами, однако следует иметь в виду, что извержение грязевого вулкана может оказывать влияние на гидратонасыщенность в его окрестности, так как процесс извержения может вносить возмущения в распределение фильтрационных свойств осадков вблизи грязевого вулкана и давления в питающем резервуаре и вышележащей среде, помимо возмущений температуры в канале вулкана [Feseker et al., 2014]. Эти возмущения могут приводить к разрушению накопленных газовых гидратов вследствие нарушений условий их стабильности в результате извержения вулкана.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование показало, что для всего диапазона использованных параметров скорость накопления гидратов в промежутках между извержениями грязевых вулканов может составлять порядка процентов в 100 лет, что в десятки раз превышает скорость накопления гидратов в рассеянных скоплениях континентальных окраин [Suetnova, 2007; Суетнова, 2011], что позволяет объяснить механизм накопления значительных скоплений газовых гидратов, приуроченных к подводным грязевым вулканам.

Моделирование количественно показало, что гидратонасыщенность в зонах подводных грязевых вулканов непостоянна и как ее эволюция зависит от геофизических свойств среды дна (градиент температуры, пористость, проницаемость, физические свойства осадков) и глубины питающего резервуара и давления в нем.

Разработанная модель дает возможность оценить возможную гидратонасыщенность, приуроченную к глубоководным грязевым вулканам в зависимости от глубины питающего резервуара и времени между извержениями.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5 и частично по гос. заданию ИФЗ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с.  
*Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Суетнова Е.И.* Математическая модель аккумуляции газовых гидратов,

приуроченных к глубоководным грязевым вулканам // ДАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 361–365.

*Каевицер В.И., Словоцов И.Б., Кривцов А.П. и др.* Подводные грязевые вулканы Таманского полуострова (по данным гидролокационных исследований) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 4. С. 27–33. DOI: 10.7868/S0203030616040039.

*Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.* Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970. 338 с.

*Суетнова Е.И.* Аккумуляция газовых гидратов в морском дне при последовательном накоплении осадков с различными транспортными свойствами // ДАН. 2011. Т. 438. № 6. С. 813–816.

*Суетнова Е.И.* Аккумуляция газовых гидратов в окрестности подводных грязевых вулканов // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 4. С.39–48.

*Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис // Литология и полез. ископаемые. 2012. № 3. С. 227–241.

*Чарный В.А.* Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостехиздат, 1963. 396 с.

*Davie M.K., Buffett B.A.* A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B1. P. 497–514.

*Davie M.K., Zatsepina O.Ye., Buffet B.A.* Methane solubility in marine hydrate environments // Marine Geology. 2004. V. 203. P. 177–184.

*Feseker T., Boetius A., Wenzhofer F. et al.* Eruption of a deep-sea mud volcano triggers rapid sediment movement // Nat. Commun. 2014. DOI: 10.1038/ncomms6385.

*Ginsburg G.D., Milkov A.V., Soloviev V.A. et al.* Gas hydrate accumulation at the Haakon Mosby Mud Volcano // Geo-Marine Lett. 1999. V. 19. P. 57–67.

*Ginsburg G.D., Soloviev V.A.* Methane migration within the submarine gashydrate stability zone under deep-water conditions // Marine Geology. 1997. V. 137. P. 49–57.

*Mazzini A.* Mud volcanism: Processes and implications // Marine and Petroleum Geology. 2009. V. 26. P. 1677–1680.

*Mazzini A., Etiope G.* Mud volcanism: An updated review // Earth-Science Rev. 2017. V. 168. P. 81–112.

*Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V., Dadashev F.G.* Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1037–1041.

*Perez-Garcia C., Feseker T., Mienert J., Berndt C.* The Hakon Mosby mud volcano: 330 000 years of focused fluid flow activity at the SW Barents Sea slope // Marine Geology. 2009. V. 262. P. 105–115.

*Rempel A.W., Buffett D.A.* Formation and accumulation of gas hydrate in porous media // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B5. P. 10151–10164.

*Sloan E.D., Koh C.A.* Clathrate Hydrates of Natural Gases // CRC Press. 2007. 752 p.

*Suetnova E.I.*. Numerical simulation of accumulation of gas hydrates during sedimentation and compaction of sediments under subaqueous conditions // *Izvestiya. Physics of solid Earth*. 2007. V. 43. № 9. P. 791–797.

*Tinivella U., Giustiniani M.* An Overview of Mud Volcanoes Associated to Gas Hydrate System // *Updates in Volcanology – New Advances in Understanding Volcanic Systems* / Ed. Karoly Nemeth. 2012. P. 22–267. ISBN 978-953-51-0915-0.

## EVOLUTION OF GAS HYDRATES ACCUMULATION IN ZONES OF SUBMARINE MUD VOLCANOES

**A. L. Sobisevich, E. I. Suetnova, R. A. Zhostkov\***

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
Bol'shaya Gruzinskaya str. 10, building 1, Moscow, 123242 Russia*

*\*e-mail: shageraxcom@yandex.ru*

Received April 04, 2018

The article examines the processes of evolution of gas hydrate accumulations, related to submarine mud volcanoes. A mathematical model and the results of numerical modeling of the accumulation of gas hydrates in the seabed in the deep structures of underwater mud volcanoes are presented.

Numerical analysis of the influence held feeder layer depth and pressure therein to the evolution of gas hydrate saturation confined to deep water mud volcanoes were performed. Modeling quantitatively showed that hydrate saturation in areas of underwater mud volcanoes is not constant and its evolution depends on the geophysical properties of the bottom medium (temperature gradient, porosity, permeability, physical properties of sediments) and the depth of the supply reservoir and pressure in it, and the rate of hydrate accumulation in tens and hundreds times the rate of hydrate accumulation in the sedimentary basins of passive continental margin.

**Key words:** gas hydrate, submarine mud volcanoes, mathematical modeling.