

УДК 650.3

ВЛИЯНИЕ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР МОРСКОГО ДНА НА ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

© 2022 г. Член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич^а, Е. И. Суетнова^а, Р. А. Жостков^{а,*}

Поступило 04.11.2021 г.

После доработки 16.11.2021 г.

Принято к публикации 29.11.2021 г.

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 значения проницаемости различных слоев осадков на эволюцию газогидратных скоплений, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам. Моделирование показало быстрое накопление значительного объема газовых гидратов в слоистых структурах морского дна.

Ключевые слова: газовые гидраты, грязевые вулканы, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S2686739722030100

Газовые гидраты содержат значительные объемы природного газа, прежде всего — метана, количество которого, по самым скромным оценкам, втрое превышает мировые запасы углеводородов [1]. Одновременно с этим естественные процессы разложения газогидратов в связи с глобальными изменениями природной среды и климата, а также по причине антропогенной активности могут в совокупности привести к развитию негативных геоэкологических сценариев [2]. Результаты натурных наблюдений с использованием глубоководных аппаратов и последующего анализа проб воды вблизи подводных грязевых вулканов было подтверждено присутствие в осадках газовых гидратов или их признаков. Так, в работах [3, 4] представлены данные об известных и предполагаемых подводных грязевых вулканах и приуроченных к ним скоплениях газовых гидратов. При этом площадь связанной с подводным грязевым вулканом области разгрузки глубинных флюидов может занимать до нескольких десятков квадратных километров дна акватории, а скорость разгрузки (высачивания) по различным оценкам может достигать первых метров в год. Естественно предположить, что скорость разгруз-

ки определяется условиями фильтрации газонасыщенного флюида непосредственно над питающим резервуаром грязевого вулкана. При достаточно низких температурах подобный характер фильтрации создает предпосылки для гидратонакопления в интервалах термобарической стабильности газовых гидратов в слоистом морском дне. В этой связи особый интерес представляет исследование скоплений газовых гидратов, приуроченных к областям развития глубоководного грязевого вулканизма.

Поскольку непосредственные измерения на глубокой воде технически затруднительны, то естественной альтернативой, позволяющей получать обоснованные оценки гидратонасыщенности морского дна и теоретически изучать процессы аккумуляции газовых гидратов, представляются построение математических моделей аккумуляции газовых гидратов и численное моделирование с использованием имеющихся геолого-геофизических данных. Ранее для исследования процесса накопления газовых гидратов в глубоководных осадочных бассейнах проводилось численное моделирование процессов эволюции гидратонасыщенности дна в зависимости от фильтрационных свойств осадков [5].

Нами были предложены модели, основанные на математическом моделировании процессов фильтрации газонасыщенного флюида и аккумуляции газовых гидратов при условии их термоба-

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shageraxcom@yandex.ru

рической стабильности в слоистых структурах морского дна, осложненных сосредоточенным проявлением грязевого вулканизма [6, 7]. Результаты численных оценок скорости фильтрации газонасыщенного флюида согласованы известными данными [3, 4], однако моделирование позволило также оценить скорость аккумуляции газовых гидратов в предположении постоянства флюидодинамических свойств осадочных слоев в зоне фильтрации газонасыщенного флюида. Слоистость морского дна над зоной сосредоточенной флюидной активности оказывает влияние на процессы грязевулканической деятельности, в свою очередь определяющие формирование и развитие скоплений газовых гидратов, приуроченных к глубоководным грязевым вулканам. Поэтому для корректной оценки гидратонасыщенности морского дна и изменений данного параметра во времени необходимо учитывать особенности глубинного строения слоисто-неоднородной геофизической среды.

Влияние слоистости осадков на процессы накопления газовых гидратов в морском дне в ходе седиментации и уплотнения осадочных масс исследовалось ранее. Было показано, что слоистость донных структур оказывает влияние на условия фильтрации газонасыщенных флюидов и, следовательно, на процесс аккумуляции газовых гидратов, ассоциированных с глубоководными грязевыми вулканами [8–10].

Рассмотрим результаты математического моделирования эволюции поддонных газогидратных скоплений в районах глубоководного грязевого вулканизма с учетом и анализом влияния непостоянства флюидодинамических свойств геофизической среды в зависимости от глубины в слое осадков над грязевулканическим резервуаром.

Предполагается, что накопление газовых гидратов происходит согласно фильтрационному механизму, т.е. при условии их термобарической стабильности за счет фильтрации глубинных газонасыщенных флюидов. Разработанная математическая модель описывает процесс фильтрации данного флюида из грязевулканического резервуара через слой осадков с последующим осаждением газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью морского дна. Подобный механизм фильтрации может существовать в интервалах времени между извержениями грязевого вулкана.

Математическая модель состоит из системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процесс фильтрации порового флюида, содержащего растворенный газ, упругой реакции пористой среды на давление порового флюида, и сохранения флюида, газа и газовых гидратов при известных начальных и гра-

ничных условиях, а также известных свойствах осадков:

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

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

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

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

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m V_f f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}, \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\rho_f C_f}{\rho C}.$$

Использованы следующие обозначения: m – пористость; ρ_f – плотность флюида; ρ_h – плотность гидрата; k – проницаемость осадков, являющаяся функцией пористости, $k = k_0 m^3$; μ – вязкость флюида; f – температура; C – теплоемкость; g – ускорение силы тяжести; K – коэффициент сжимаемости пористой среды; h – гидратонасыщенность; t – время; z – пространственная координата; v – скорость флюида; c_{eq} – концентрация газа в насыщающем флюиде в условиях присутствия гидрата газа [11]; c_h – концентрация газа в гидрате; p_f – давление флюида.

Для локализации зоны стабильности гидратов в зависимости от давления и температуры использовались известные зависимости [11, 12]. Система решалась численно с помощью авторского программного обеспечения, использующего явную условно сходящуюся разностную схему. Для начальных и граничных условий выбраны соответствующие реализации процесса фильтрации газонасыщенного порового флюида и пределов термобарической стабильности при осаждении газового гидрата в морском дне.

Результаты модельных расчетов гидратонасыщенности через 12 и 30 лет после начала фильтрации газонасыщенного флюида над грязевулканическим резервуаром для различных сценариев изменения проницаемости среды дна представлены далее на рисунках, пояснения даны в подрисуночных подписях.

Сравнение результатов вычислений гидратонасыщенности показывает роль флюидодинамических свойств среды морского дна в области реализации процесса аккумуляции газовых гидратов. Так, из рис. 1 следует, что слой с постоянной проницаемостью 10^{-12} м^2 через 12 лет обнаруживает гидратонасыщенность почти такую же, как и слой со скачком проницаемости от 10^{-13} до 10^{-12} м^2 , рас-

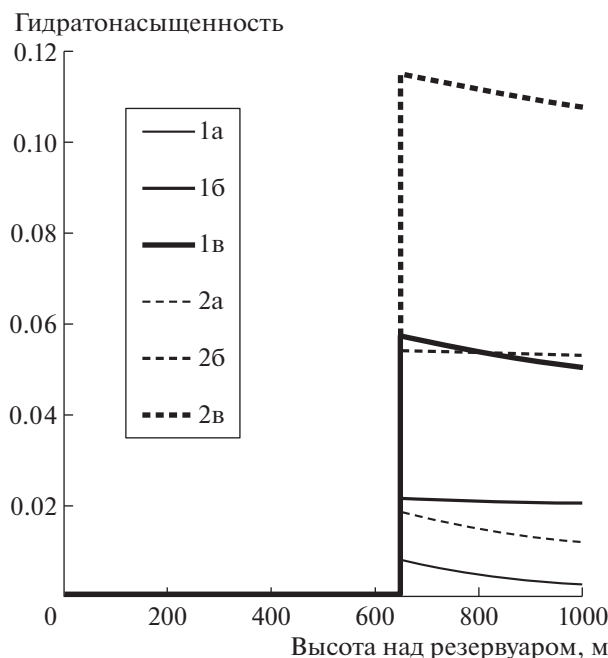


Рис. 1. Эволюция гидратонасыщенности для плавного скачка значения проницаемости среды от 10^{-13} до 10^{-12} м² на высоте 175 м над питающим слоем (расположенным на глубине $L = 1000$ м) и постоянной по разрезу проницаемости слоя осадков над ним; остальные параметры: $m_0 = 0.3$, $\mu = 2.6 \times 10^{-3}$ Па с, $\rho_f = 1.0 \times 10^3$ кг м⁻³, $\rho_s = 2.65 \times 10^3$ кг м⁻³, $K = 10^{10}$, $c_h = 0.12$, фоновый градиент температуры равен 0.05 м⁻¹, градиент концентрации метана в поровом флюиде в присутствии гидрата равен 5×10^{-3} моль К⁻¹ (для внешнего давления 12 МПа, глубина моря около 1200 м). Сплошные линии (индекс “1”) – через 12 лет от начала фильтрации, пунктирные (индекс “2”) – через 30 лет. Тонкие линии (индекс “а”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-13}$ м², средние линии (индекс “б”) – скачок проницаемости от $k_0 = 10^{-13}$ до $k_0 = 10^{-12}$ м² и жирные линии (индекс “в”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-12}$ м².

положенный в 175 м над грязевулканическим резервуаром через 30 лет фильтрации и гидратонакопления. Если же проницаемость по разрезу постоянна (10^{-13} м²), то гидратонасыщенность лишь через 30 лет сравнивается с аналогичным показателем для слоя со скачком проницаемости от 10^{-13} до 10^{-12} м², лежащим в 175 м над резервуаром не протяжении 12 лет.

Представленные на рис. 2 результаты модельных расчетов показывают, что процесс аккумуляции газовых гидратов в случае постоянной проницаемости 10^{-12} м² через 12 лет приводит к намного большей гидратонасыщенности дна, чем будет через 30 лет в случае скачка проницаемости

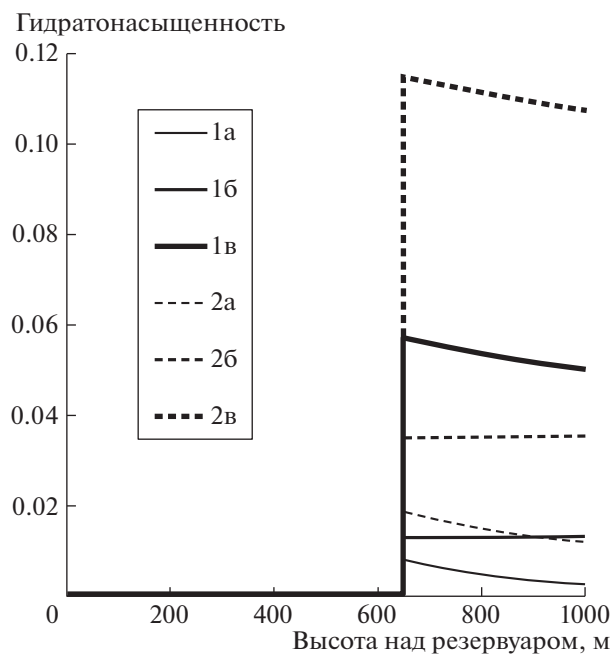


Рис. 2. Гидратонасыщенность при скачке проницаемости на 375 м над зоной питания, значением коэффициента проницаемости среды от 10^{-13} до 10^{-12} м² и постоянной по разрезу проницаемости, остальные параметры – см. подпись к рис. 1. Сплошные линии (индекс “1”) – через 12 лет от начала фильтрации, пунктирные (индекс “2”) – через 30 лет. Тонкие линии (индекс “а”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-13}$ м², средние линии (индекс “б”) – скачок проницаемости от $k_0 = 10^{-13}$ до $k_0 = 10^{-12}$ м² и жирные линии (индекс “в”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-12}$ м².

от 10^{-13} до 10^{-12} м² на уровне 375 м от глубинного резервуара.

Рисунок 3 демонстрирует результаты моделирования для возможных вариантов более низкой проницаемости $k_0 = 10^{-14}$ м² при скачке проницаемости на 175 м над грязевулканическим очагом. Сравнение рис. 1 и рис. 3 показывает, что гидратонасыщенность уменьшается почти на порядок при соответствующем снижении проницаемости морского дна. Уменьшение глубины слоя, в котором происходит изменение проницаемости с меньшей на большую, приводит и к уменьшению результирующей гидратонасыщенности слоя за то же время (см. рис. 3, 4).

Таким образом, результаты моделирования для различных возможных значений проницаемости слоя осадков показывают значительную зависимость скорости аккумуляции газовых гидратов от распределения проницаемости по глубине в слоистых структурах морского дна в зоне фильтрации, а также возможность быстрого накопле-

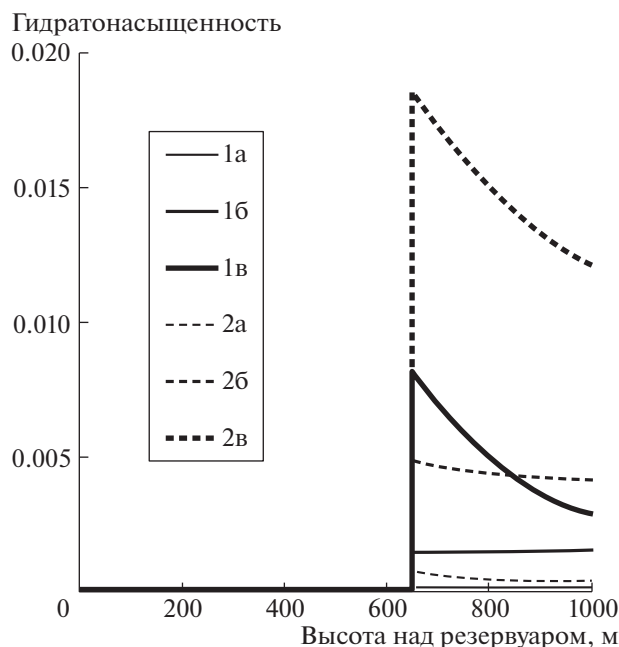


Рис 3. Гидратонасыщенность при скачке проницаемости на 175 м над зоной питания, значением коэффициента проницаемости среды от 10^{-14} до 10^{-13} м² и постоянной по разрезу проницаемости, остальные параметры – см. подпись к рис. 1. Сплошные линии (индекс “1”) – через 12 лет от начала фильтрации, пунктирные (индекс “2”) – через 30 лет. Тонкие линии (индекс “а”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-14}$ м², средние линии (индекс “б”) – скачок проницаемости от $k_0 = 10^{-14}$ до $k_0 = 10^{-13}$ м² и жирные линии (индекс “в”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-13}$ м².

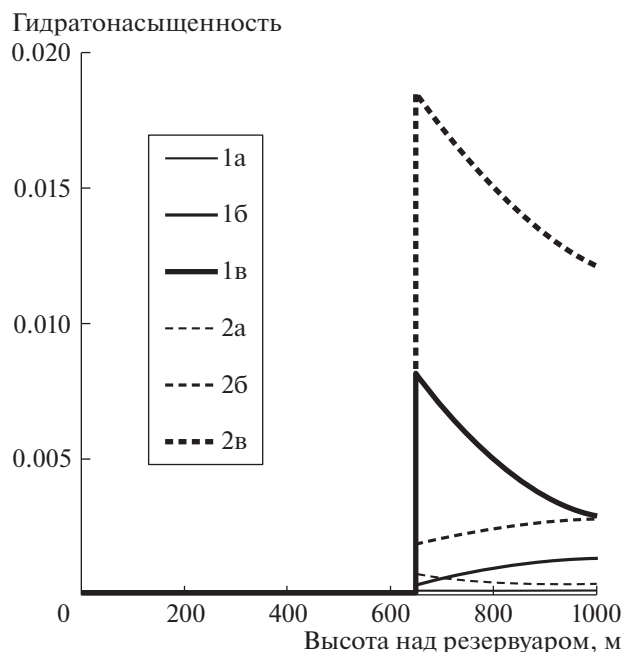


Рис 4. Гидратонасыщенность при скачке проницаемости на 375 м над зоной питания, значения коэффициента проницаемости среды от 10^{-14} до 10^{-13} м² и постоянной по разрезу проницаемости, остальные параметры – см. подпись к рис. 1. Сплошные линии (индекс “1”) – через 12 лет от начала фильтрации, пунктирные (индекс “2”) – через 30 лет. Тонкие линии (индекс “а”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-14}$ м², средние линии (индекс “б”) – скачок проницаемости от $k_0 = 10^{-14}$ до $k_0 = 10^{-13}$ м² и жирные линии (индекс “в”) – 1 слой с постоянной проницаемостью $k_0 = 10^{-13}$ м².

ния значительных объемов газовых гидратов по сравнению с осадочными структурами пассивных окраинных бассейнов.

По-видимому, различия в гидратонасыщенности участков морского дна, приуроченных к грязевулканическим структурам, определяются не только глубиной питающего резервуара, давления в нем и временем фильтрационного процесса газонасыщенного флюида, но и сильным влиянием флюидодинамических свойств слоистой среды, особенно их вариацией по глубине.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frozen Heat: A UNEP Global Outlook on Methane Gas Hydrates. *Beaudoin Y.C., Dallimore S.R., and Boswell R.* (eds). United Nations Environment Programme. 2014. V. 2. 96 p.
2. *Tinivella U., Giustiniani M., van de la Cruz Vargas Cordero I., Vasilev A.* Gas Hydrate: Environmental and Climate Impacts // *Geosciences*. 2019. 9. 443; <https://doi.org/10.3390/geosciences9100443>
3. *Mazurenko L.L., Soloviev V.A.* Worldwide Distribution of Deep-water Fluid Venting and Potential Occurrences of Gas Hydrate Accumulations // *Geo-Marine Letters*. 2003. 23. P. 162–176.
4. *Milkov A.V.* Worldwide Distribution of Submarine Mud Volcanoes and Associated Gas Hydrates // *Marine Geology*. 2000. 167. P. 29–42.
5. *Суетнова Е.И.* Моделирование аккумуляции газ-гидратов при накоплении и уплотнении осадков в субаквальных условиях // *Физика Земли*. 2007. № 9. С. 87–93.
6. *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.
7. *Собисевич А.Л., Суетнова Е.И., Жостков Р.А.* Эволюция газогидратных скоплений в зонах глубоководных вулканов // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 1. С. 105–110.

- водных грязевых вулканов // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 45–51.
8. Суетнова Е.И. Уплотнение неоднородных осадков вязкоупругой реологии // Физика Земли. 2003. № 1. С. 77–83.
 9. Суетнова Е.И. Влияние уплотнения осадков и фильтрации поровых флюидов на тепловой режим осадочных бассейнов // Физика Земли. 2005. № 12. С. 53–57.
 10. 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.
 11. Davie M.K., Zatsepina O.Ye., Buffet B.A. Methane Solubility in Marine Hydrate Environments // Mar. Geol. 2004. V. 203. P. 177–184.
 12. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 2 ed. N.Y.: Marcel Dekker, 1998. 705 p.

INFLUENCE OF LAYERED STRUCTURES OF THE SEABED ON THE FORMATION OF GAS HYDRATES IN THE SURROUNDING AREA OF DEEP-SEA VOLCANOES: A MATHEMATICAL MODEL

Corresponding member of the RAS A. L. Sobisevich^a, E. I. Suetnova^a, and R. A. Zhostkov^{a,#}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: shageraxcom@yandex.ru*

The article discusses the evolutionary processes of gas hydrate accumulations associated with deep-sea mud volcanoes. A mathematical model and the results of numerical modeling of the gas hydrates accumulation in the seabed in the deep structures of underwater mud volcanoes are presented. The influence of the permeability of various sediment layers on the evolution of gas hydrate accumulations associated with deep-sea mud volcanoes is quantitatively analyzed. Modeling has shown the rapid accumulation of significant volumes of gas hydrates in the layered structures of the seabed.

Keywords: gas hydrates, mud volcanoes, mathematical modeling