

УДК 502:631.4(98)

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ ГАЗА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ГАЗОГИДРАТОВ

© 2025 г. И. А. Гарагаш^{1, 2, *}, Л. И. Лобковский³, И. П. Семилетов⁴

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильчева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: garagash@ifz.ru

Изучен процесс формирования путей фильтрации газа на морском дне, возникающих в результате разложения газогидратов. Показано, что образующаяся при надвигании глыбы льда (стамухи) на морское дно борозда выпахивания возмущает напряженное состояние донных слоев. Установлено, что формирование путей миграции газа можно объяснить возмущением напряженного состояния донных слоев в процессе образования борозд выпахивания. Создана геомеханическая модель формирования путей фильтрации газа в результате разложения газогидратов в упругопластической среде с вкраплениями газогидратов, распределенных случайным образом. Для описания разрушения среды используется закон неассоциированного пластического течения с предельным условием Друкера–Прагера и разупрочнением. Разупрочнение ведет к развитию неустойчивости и локализации сдвиговой деформации в узких зонах. В результате происходит локализованное растрескивание толщи, что создает пути для выхода газа.

Ключевые слова: газогидраты, упругопластическая среда с разупрочнением, неустойчивость, локализация деформации, пути фильтрации газа.

Для цитирования: Гарагаш И.А., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Механизм формирования путей миграции газа в донных отложениях при разложении газогидратов // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 12–21. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_12

Введение

Осадочная горная порода, насыщенная газогидратами, представляет собой композитный материал, состоящий из минеральных и газогидратных зерен. При визуальных исследованиях гидратосодержащих пород установлено, что гидраты метана образуют в породах текстуры, схожие с криотекстурами в мерзлых породах. В извлеченных образцах присутствуют отдельные частицы гидратов, рассеянных в осадочной толще. Кроме того, гидраты могут существовать в виде межзернового цемента, узлов, тонких прослоев, жил и массивных пластов (рис. 1).

Начиная с глубин 270 м, газогидраты существуют в стабильном, равновесном состоянии. Выше по разрезу гидраты могут находиться в метастабильном, законсервированном состоянии. Эффект самоконсервации газовых гидратов при понижении давления ниже равновесного в области отрицательных температур заключается в образовании непроницаемой для газа оболочки льда в результате замерзания воды, выделяющейся при поверхностном разложении гидрата, что останавливает дальнейшее разложение гидрата и приводит к его стабилизации [Istomin et al., 2006; Якушев, 2009]. В результате изменения теплового режима мерзлотно-гидратной системы возможна частичная потеря стабильности этих гидратов, приводящая к очаговым газовыделениям над дестабилизованными участками. В 2010 г. была впервые проведена междисциплинарная морская экспедиция в море восточной Арктики, в результате которой обнаружены мощные газовые выбросы метана (рис. 2а)

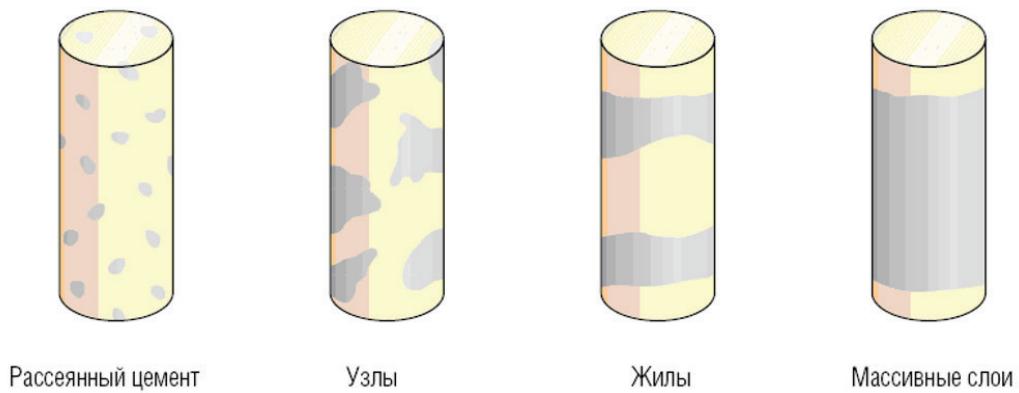


Рис. 1. Возможное распределение гидратов в осадочных породах

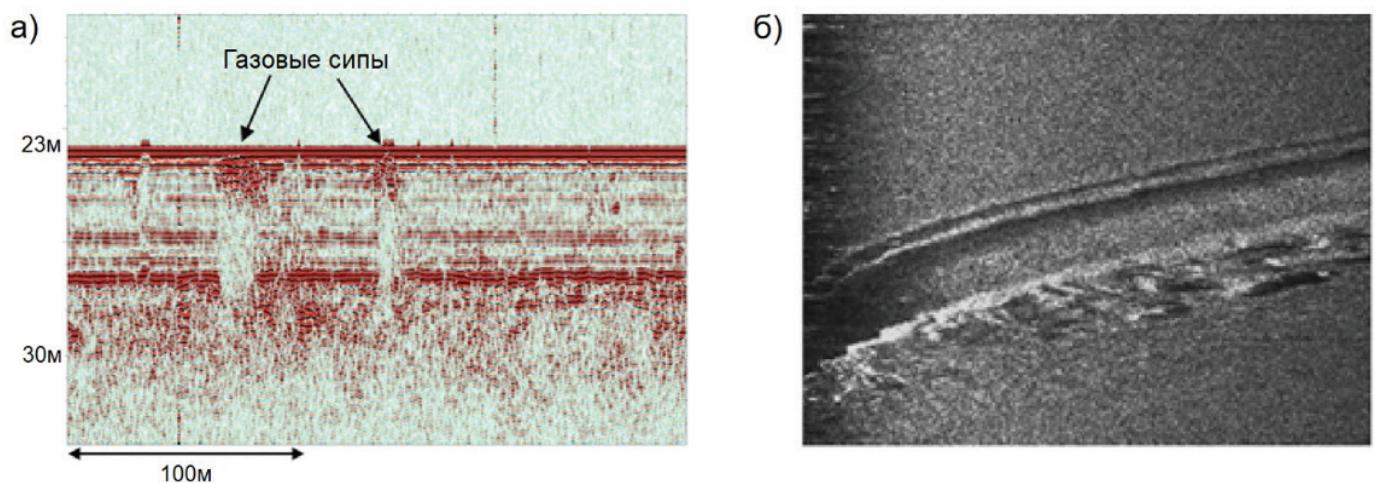


Рис. 2. Пути миграции газа в донных отложениях (а), глубоководные борозды ледового выпахивания (б)

за счет деградации подводных многолетнемерзлых пород [Shakhova et al., 2010]. Была установлена приуроченность газовых потоков к бороздам выпахивания [Лобковский и др., 2013; Shakhova et al., 2017], создаваемых в процессе взаимодействия движущегося льда с донной поверхностью (рис. 2б), что позволяет рассматривать ледовую экзарацию (ледовое выпахивание) как один из процессов, нарушающих сплошность верхнего слоя донных отложений и ведущих к усилению выбросов метана в водную толщу. При этом, как показывает интерпретация сейсмических данных, движение метана происходит по локализованным путям в донных отложениях.

Модель деформирования верхнего слоя осадков

Единичный объем твердого гидрата может содержать до 100–150 объемов углеводородных газов. Их освобождение приводит к резкому росту внутрипорового давления p и снижению прочности горной породы. Следствием этого является исчерпание несущей способности осадочной толщи и развитие пластических деформаций. Разупрочнение грунта связано с нарушением его структуры и должно приводить не только к уменьшению угла трения, но и к снижению сцепления. Возникающее при этом пластическое течение определяется девиатором тензора напряжений $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$, средним напряжением $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$, интенсивностью касательных напряжений $T = \sqrt{s_{ij}s_{ij}}$ и происходит при выполнении предельного условия Друкера–Прагера

$$T + \alpha\sigma = (c - \alpha p), \quad (1)$$

где c – сцепление, α – коэффициент внутреннего трения.

Определяющие соотношения, связывающие между собой компоненты тензора приращений напряжений $d\sigma_{ij}$ и компоненты тензора приращений деформаций $d\varepsilon_{kl}$ в этом случае имеют вид:

$$d(\sigma_{ij} + p\delta_{ij}) = E_{ijkl}d\varepsilon_{kl}, \quad (2)$$

где $d\varepsilon_{ij} = (du_{i,j} + du_{j,i})/2$ – приращения деформаций, du_i – приращения перемещений.

Коэффициенты определяющего соотношения (2) имеют вид [Rudnicki, Rice, 1975; Гарагаш, Николаевский, 1989]:

$$E_{ijkl} = G \left\{ \left[\left(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj} \right) + \left(\frac{K}{G} - \frac{2}{3}\delta_{kl}\delta_{ij} \right) \right] - \frac{G}{(H+G)+\alpha\lambda K} \left(\frac{S_{ij}}{T} + \frac{K}{G}\lambda\delta_{ij} \right) \left(\frac{S_{kl}}{T} + \frac{K}{G}\alpha\delta_{kl} \right) \right\}. \quad (3)$$

Здесь G – модуль сдвига, K – модуль объемного сжатия, H – модуль пластического упрочнения, α – коэффициент внутреннего трения, λ – коэффициент дилатансии.

Входящий в (3) параметр λ называется коэффициентом дилатансии и связывает между собой неупругое изменение объема при сдвиге $d\varepsilon^{pl}$ и интенсивность приращений пластических деформаций сдвига $d\Gamma^{pl}$

$$d\varepsilon^{pl} = \lambda d\Gamma^{pl}. \quad (4)$$

Входящий в (3) модуль пластического упрочнения H связывает между собой приращения средних напряжений $d\sigma$ и интенсивность касательных напряжений dT с интенсивностью приращений пластических деформаций сдвига соотношением

$$d\Gamma^{pl} = \frac{1}{H} (dT + \alpha d\sigma). \quad (5)$$

Типичная диаграмма деформирования горных пород, показывающая изменения интенсивности сдвиговых напряжений T при увеличении полной интенсивности деформаций Γ , приведена на рис. 3а [Гарагаш и др., 2018]. Неупругое деформирование наступает после достижения предела упругости T_{pl} и сопровождается развитием исходных трещин и образованием новых. При этом эффективные механические свойства постепенно падают и наступает разупрочнение материала, выражющееся в реализации нисходящей ветви диаграммы деформирования.

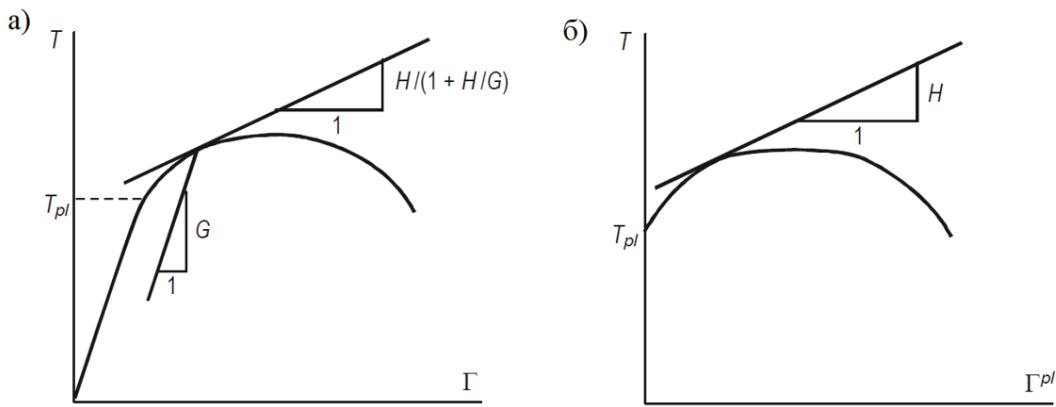


Рис. 3. Типичная диаграмма деформирования горных пород в осях T – Γ (а) и T – Γ^{pl} (б)

Если перестроить кривую деформирования горных пород в осях T – Γ^{pl} , она приобретет вид, показанный на рис. 3б. В этом случае модуль пластического упрочнения H будет равен тангенсу угла наклона касательной.

Переход на падающую ветвь диаграммы деформирования ведет к развитию неустойчивости пластического течения и локализации сдвиговой деформации в узких зонах, по которым в конечном итоге и происходит разрушение.

Для трехмерного численного моделирования разрушения верхнего слоя осадков будем использовать программный код FLAC^{3D} [Itasca, 2006], реализующий явную конечноразностную схему решения трехмерных задач механики сплошных сред. FLAC^{3D} позволяет моделировать нелинейное поведение горных пород в условиях пластического течения за пределом прочности, в том числе и в случае развития реологической неустойчивости, ведущей к образованию зон локализации неупругой деформации.

Численное моделирование формирования каналов миграции газа в донных отложениях

Для моделирования процесса формирования путей выхода газа на поверхность воспользуемся моделью неассоциированного пластического течения в сочетании с критерием прочности Друкера–Прагера, зависящим от внутреннего трения, и разупрочнением. Для численного анализа неустойчивого деформирования газогидратной толщи обратимся к модели осадочной толщи с газогидратами, заполняющими межзерновое пространство случайным образом (рис. 4).

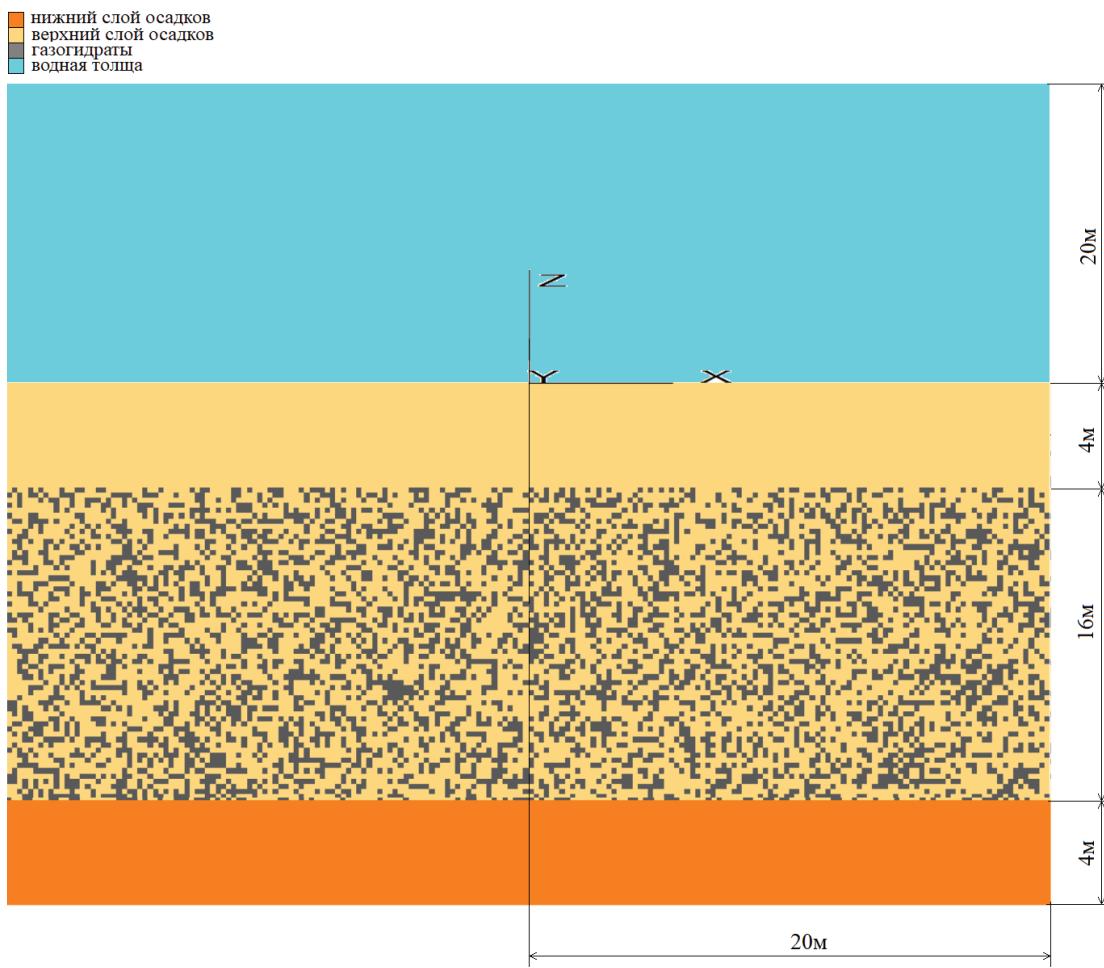


Рис. 4. Осадочная толща с газогидратами

Расчет выполним в два этапа. Сначала рассмотрим начальное напряженное состояние модели с вкраплениями газогидратов, расположенных случайным образом, и нагруженное силами собственного веса и весом вышележащей водной толщи. При надвигании стамухи на морское дно образуется борозда выпахивания. В расчетной модели борозда представлена в виде прямоугольного выреза шириной 10 м

и глубиной 1 м (рис. 5). На верхней границе при этом задается распределенная нагрузка от давления водной толщи и удаленной породы в борозде выпахивания. На вертикальных и нижней границах модели запрещены нормальные перемещения.

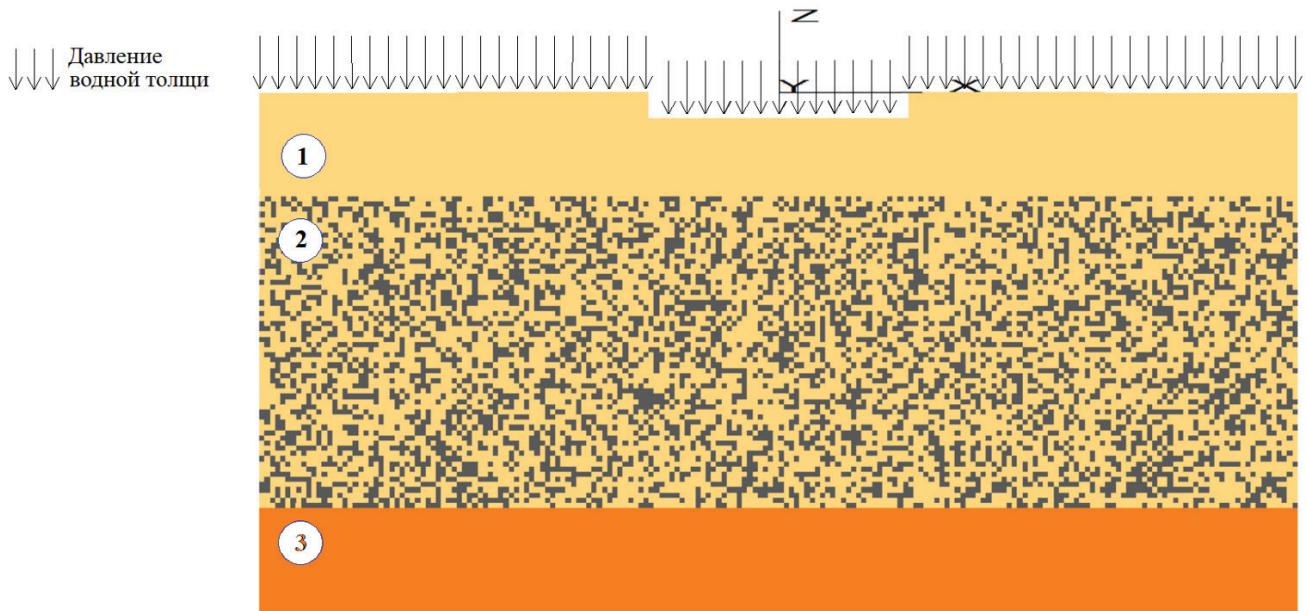


Рис. 5. Расчетная схема осадочной толщи после образования борозды выпахивания: 1 – придонный слой, 2 – газогидратный слой, 3 – нижний слой

В начальном состоянии осадочная толща уже находится в сложном напряженном состоянии. Это видно по распределению вертикального (литостатического) напряжения (рис. 6а), что обусловлено неоднородным строением слоя, включающего газогидратные вкрапления. Появление борозды возмущает напряженное состояние. Появляется обширная область растягивающих напряжений 0.1–0.15 МПа (рис. 6б).

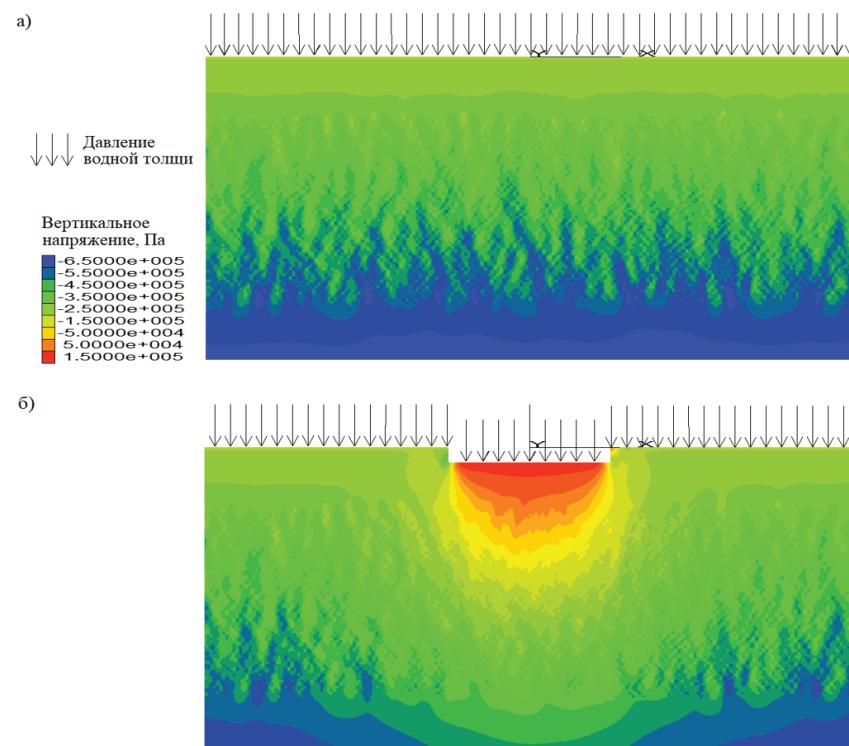


Рис. 6. Распределение вертикальных напряжений в начальном состоянии (а) и после образования борозды выпахивания (б)

В работах [Lobkovsky, Ramazanov, 2021; Lobkovsky et al., 2022] сделан вывод, что добавочные напряжения порядка 0.1 МПа, возникающие при распространении термомеханических деформационных волн, являются триггером разрушения метастабильных газогидратов, находящихся в мерзлых осадочных породах. Этих напряжений достаточно для развития неустойчивости гранулированной осадочной среды на микроуровне и разрушения ледяной пленки [Гарагаш, Лобковский, 2024]. Поэтому предполагается, что в зоне возмущения напряжений начинается разложение газогидратов, которое распространяется на всю толщу.

Равновесное давление в системе газ – вода (лед) – гидрат находится в диапазоне 2.2–2.6 МПа [Истомин и др., 2018]. По оценкам, выполненным для Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, давление газа в порах должно достигать значений 2–3 МПа [Хименков и др., 2023]. Исходя из этого примем, что разложение гидратов ведет к возрастанию порового давления до $p = 30$ атм. Такое давление ведет к развитию пластических деформаций в покрышке и разупрочнению породы. В результате разупрочнения (рис. 3) происходит локализация неупругой деформации, что ведет к перестройке напряженного состояния.

Для расчетов были выбраны следующие механические характеристики.

Слой 1 (верхний) с плотностью $\rho = 2200$ кг/м³: модуль сдвига $G = 4.44 \cdot 10^8$ Па, объемный модуль $K = 1.33 \cdot 10^9$ Па, сцепление $c = 2 \cdot 10^6$ Па, прочность на растяжение $\sigma' = 1 \cdot 10^4$ Па, коэффициент трения $\alpha = 0.2$, коэффициент дилатансии $\lambda = 0.2$.

Слой 2 (с включениями газогидратов). Свойства вмещающей среды те же, что и в слое 1. Для включений газогидратов модуль сдвига $G = 9.92 \cdot 10^7$ Па, объемный модуль $K = 1.65 \cdot 10^8$ Па, сцепление $c = 2 \cdot 10^6$ Па, прочность на растяжение $\sigma' = 1 \cdot 10^4$ Па, коэффициент трения $\alpha = 0.3$, коэффициент дилатансии $\lambda = 0.2$.

Слой 3 (нижний) с модулем сдвига $G = 1.24 \cdot 10^9$ Па, объемным модулем $K = 2.07 \cdot 10^9$ Па, сцеплением $c = 1 \cdot 10^7$ Па, прочностью на растяжение $\sigma' = 1 \cdot 10^6$ Па, коэффициентом трения $\alpha = 0.5$ и коэффициентом дилатансии $\lambda = 0$.

Плотность всех слоев выбрана равной $\rho = 2200$ кг/м³.

Как видно на рис. 7 на стадии разупрочнения сцепление породы падает практически до нуля и в покрышке формируются узкие зоны пониженного сцепления.

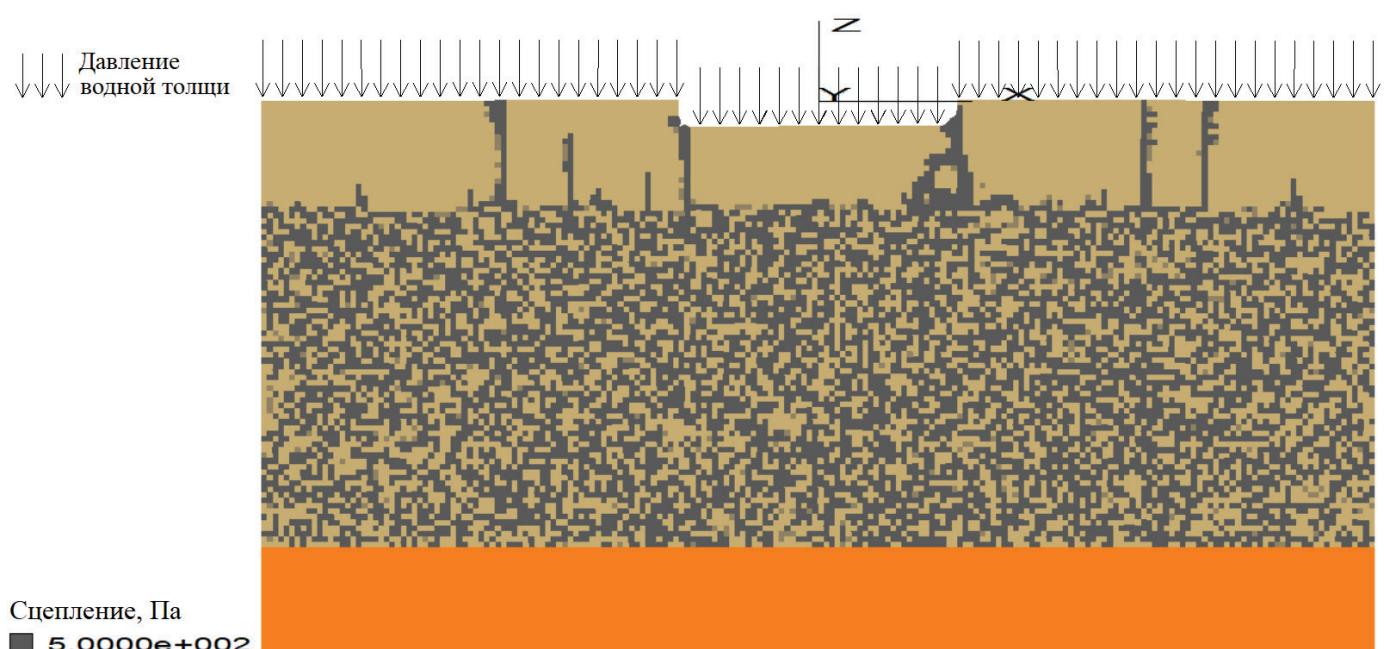


Рис. 7. Распределение зон пониженного сцепления

На рис. 8 показано, что в результате повышения давления в зернах газогидратов начальное распределение деформаций сдвига (рис. 8а) перестраивается и локализуется в узких зонах (рис. 8б), совпадающих с зонами пониженного сцепления.

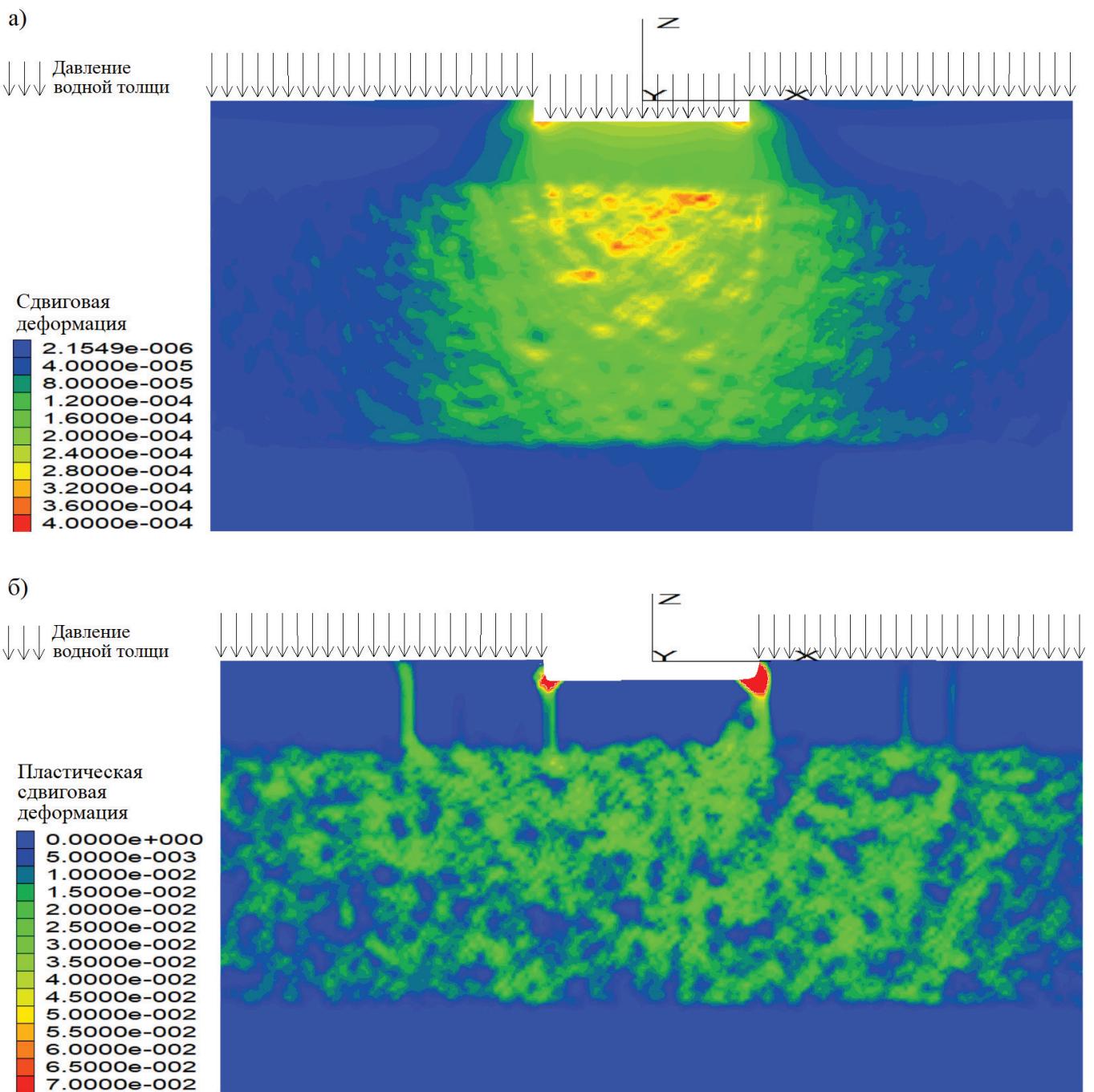


Рис. 8. Распределение сдвиговых деформаций в начальном состоянии (а) и на стадии разложения метастабильных газогидратов (б)

К зонам пониженного сцепления приурочены и выходящие на поверхность разуплотненные узкие зоны в покрышке (рис. 9). На рис. 9а показано распределение объемных деформаций в начальном состоянии и после повышения порового давления (рис. 9б). Таким образом, в результате разуплотнения формируются каналы для выхода газовых потоков на поверхность, как это показано на рис. 2.

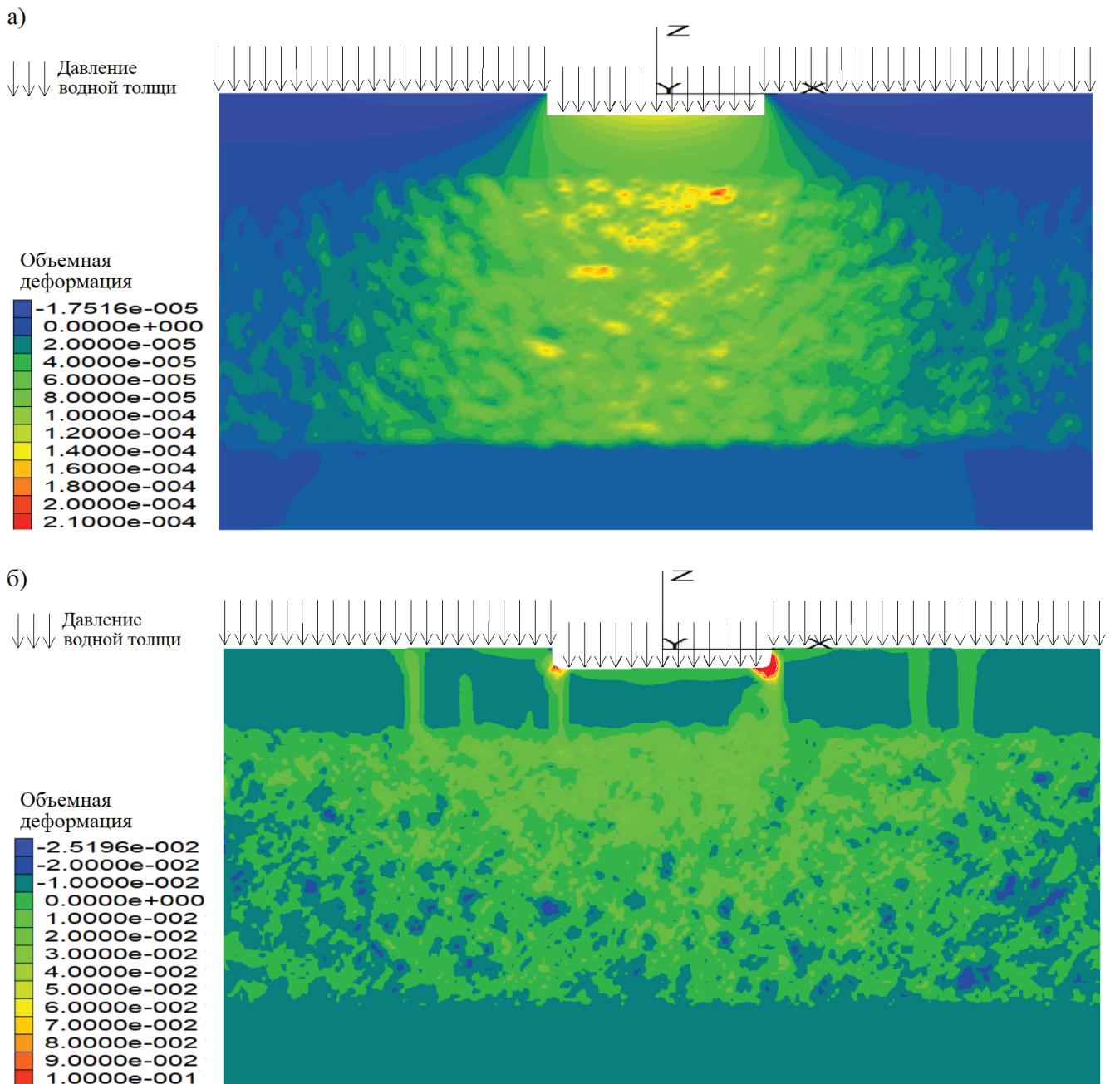


Рис. 9. Распределение объемных деформаций в начальном состоянии (а) и на стадии разложения метастабильных газогидратов (б)

Заключение

Численный анализ неустойчивого деформирования газогидратной толщи выполнен в рамках модели осадочной толщи с вкраплениями газогидратов, распределенных случайным образом. Для моделирования процесса разрушения покрышки использовалась модель разупрочняющейся упругопластической среды с предельным условием Друкера–Прагера. Показано, что разупрочнение среды ведет к развитию неустойчивости пластического течения и формированию разуплотненных узких зон в покрышке, представляющих собой каналы, по которым происходит выход газовых потоков на поверхность (рис. 9б).

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-67-00025).

Список литературы

Гарагаш И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализация пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12. №. 1. С. 131–183.

Гарагаш И.А., Дубиня Н.В., Русина О.А., Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Определение прочностных свойств горных пород по данным трёхосных испытаний // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 57–72. <https://doi.org/10.21455/gr2018.3-4>

Гарагаш И.А., Лобковский Л.И. О механизме разрушения ледяных пленок метастабильных газогидратов и его возможном приложении к процессу эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 1. С. 36–45. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-36-45>

Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А., Станиловская Ю.В., Бадец К. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтьГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42. <https://elibrary.ru/xxiehz>

Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Либина Н.В., Ананьев Р.А., Дмитревский Н.Н. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 2. С. 185–188. <https://doi.org/10.7868/S0869565213080203>

Хименков А.Н., Дернова Е.Щ. Станиловская Ю.В. Подходы к изучению влияния газовой составляющей на механические свойства мерзлых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 1. С. 76–86. <https://doi.org/10.31857/S0869780923010058>

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. Москва : ВНИИГАЗ. 2009. – 192 с.

Istomin V.A., Yakushev V.S., Makhonina N.A., Kwon V.G., Chuvilin E. Self-preservation phenomenon of gas hydrates.

// Digest Gas Industry of Russia. 2006. Vol. 4 (12). P. 16–27.

Itasca Consulting Group, Inc. 2006. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Ver. 3.1, User's Manual. Minneapolis: Itasca.

Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. Thermomechanical waves in the elastic lithosphere–viscous asthenosphere system // Fluid Dyn. 2021. Vol. 56 (6). P. 765–779. <https://doi.org/10.1134/S0015462821060100>

Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation // Geosciences. 2022. Vol. 12. P. 372. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100372>

Rudnicki J.W., Rice J.R. Conditions for localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials // J. Mech. Phys. Solids. 1975. Vol. 23 (6). P. 371–390. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(75\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0022-5096(75)90001-0)

Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // Journal Geophys. Res. 2010. Vol. 115. <https://doi.org/10.1029/2009JC005602>

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy T., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaugh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. Vol. 8. P. 15872. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>

MECHANISM OF FORMATION OF GAS MIGRATION PATHS IN BOTTOM SEDIMENTS DURING THE DECOMPOSITION OF GAS HYDRATES

© 2025 I. A. Garagash^{1, 2,*}, L. I. Lobkovsky³, I. P. Semiletov⁴

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴*Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

*E-mail: garagash@ifz.ru

The formation of gas filtration pathways on the seafloor resulting from gas hydrate decomposition is studied. It is shown that the plowing furrow formed by a stamukhi thrusting onto the seafloor disturbs the stress state of the bottom layers. It is established that the formation of gas migration pathways can be explained by the disturbance of the stress state of the bottom layers during furrow formation. A geomechanical model is developed for the formation of gas filtration pathways resulting from gas hydrate decomposition in an elastic-plastic medium with gas hydrate inclusions randomly distributed. The law of non-associated plastic flow with the Drucker–Prager limit condition and softening is used to describe the failure of the medium. Softening leads to the development of instability and localization of shear deformation in narrow zones. This results in localized cracking of the strata, which creates pathways for gas escape.

Keywords: gas hydrates, elastic-plastic medium with softening, instability, deformation localization, gas filtration paths.