

УДК 502:631.4(98)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОКМАРКОВ НА МОРСКОМ ДНЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

© 2024 г. И. А. Гарагаш<sup>1,2,\*</sup>, Л. И. Лобковский<sup>3</sup>, И. П. Семилетов<sup>4</sup><sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН, Москва, Россия<sup>3</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия<sup>4</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

\*E-mail: garagash@ifz.ru

Создана геомеханическая модель формирования покмарков на морском дне, возникающих в результате разложения газогидратов. Процесс разрушения и образования покмарков происходит в среде, поведение которой описывается моделью нелинейной ползучести в сочетании с критерием прочности, зависящим от внутреннего трения. Используются определяющие соотношения для упруго-вязко-пластической среды со степенным законом ползучести, зависящим от температуры. Для описания разрушения среды используется закон неассоциированного пластического течения с предельным условием Друкера–Прагера и разупрочнением. Разупрочнение ведет к развитию неустойчивости вязкопластического течения и локализации сдвиговой деформации в узких зонах, по которым и происходит разрушение. Анализ развития деформаций и напряжений показал, что сдвиговая деформация локализуется на внутреннем контуре куполовидной покрывки, формируя коническую узкую зону. После ее выхода на поверхность сцепление падает до нуля и сила, создаваемая давлением, выталкивает материал на поверхность, завершая образование кратера. Время формирования конической поверхности зависит от порового давления во включении. Если давление не превышает критического значения, то напряжения в покрывке не достигают предела прочности, поверхность разрушения не формируется и покмарк не образуется.

**Ключевые слова:** покмарк, газогидраты, упруго-вязко-пластическая среда с разупрочнением, неустойчивость, локализация деформации.

**Для цитирования:** Гарагаш И.А., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Численное моделирование образования покмарков на морском дне в результате разложения газогидратов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 4. С. 1–10. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2024\\_16\\_4\\_1](https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_1)

### Введение

Осадочная горная порода, насыщенная газогидратами, представляет собой композитный материал, состоящий из минеральных и газогидратных зерен. Увеличение температуры или снижение давления приводит к разложению гидратов на газ и воду и идет с поглощением тепла [Истомин, Якушев, 1992]. Фазовое превращение изменяет плотность и механические свойства материала. Единичный объем твердого гидрата может содержать до 100–150 объемов углеводородных газов. Их освобождение приводит к резкому росту внутривещного давления и снижению прочности горной породы. Следствием этого является исчерпание несущей способности осадочной толщи и бифуркация процесса деформирования, приводящая к локализации деформации в отдельных зонах.

Наиболее ярко эти явления должны развиваться в зонах, где газогидраты находятся в метастабильном состоянии. Такое состояние связано с эффектом самоконсервации газовых гидратов при понижении давления ниже равновесного в области отрицательных температур и 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 [Истомин, Якушев, 1992; Davidson et al., 1986]. Явление самоконсервации значительно расширяет термодинамическую область существования газовых гидратов в природе. Эксперименты подтвердили теоретическую возможность существования гидрата метана и других углеводородных газов по всему разрезу криолитозоны, где есть мерзлые породы [Якушев, 2009]. Причем до глубин 270 м гидраты могут находиться в метастабильном, законсервированном состоянии, а с глубин 270 м и ниже (при пресных подземных водах) – уже в стабильном, равновесном. Наличие природных газовых гидратов в криолитозоне было подтверждено в результате исследований мерзлого керна Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения [Якушев, 2009]. В работе [Гарагаш, Лобковский, 2024] сформулированы механизмы разрушения, которые могут повлиять на диссоциацию природных газогидратов. Исследована неустойчивость подвижных гранул осадочной толщи и получено условие бифуркации микрополярного континуума, с которым может быть связана эмиссия метана из зон скопления метастабильных реликтовых газогидратов.

В настоящей работе на основе результатов численного расчета деформирования осадочной породы в результате расширения газогидратного включения в упруго-вязко-пластической осадочной толще изучен процесс формирования воронок (покмарков) на морском дне.

### Природные явления, вызываемые разложением газогидратов

Разложение газогидратов вызывает выделение значительных объемов метана в атмосферу и может приводить к катастрофическим природным явлениям. Летом 2014 г. появилась информация об обнаружении в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) в юго-западной части полуострова Ямал, в 30 км южнее уникального по запасам Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, гигантского глубокого кратера типа воронки взрыва, заполненного водой лишь в нижней части. Средние внутренний и внешний диаметры кратера составили 26 и 40 м, а его глубина – около 50 м. Вскоре появилась информация о еще шести подобных объектах. Большинство специалистов признало, что обнаруженные кратеры являются воронками газовых выбросов [Богоявленский, 2014].

Непосредственно перед выбросом газа в ММП (многолетнемерзлых породах) существовала заполненная газом полость, а выброшенная на поверхность земли порода до выброса формировала только выпуклую крышку полого объекта в виде верхнего слоя мерзлых осадков, толщина которых составляет около 8 м. Наиболее вероятно, что газ, заполнивший подземную первоначально водонасыщенную полость в ММП, пришел в нее по системам субвертикальных трещин и разломов, хотя не исключается и разложение газогидратов за счет изменения термобарических условий, связанных с повышенным потоком тепла из недр Земли.

По-видимому, родственными природными явлениями являются покмарки (*pockmark* (англ.) – оспина, выбоина), широко распространенные на морском дне в интервалах глубин от 30 до 3000 м. Так, например, в результате геофизических исследований на Чукотском плато с помощью съемок многолучевым эхолотом на глубинах моря более 400 м были обнаружены донные воронки, напоминающие покмарки [Judd, Hovland, 2007]. Аналогичные структуры были зафиксированы в процессе мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей [Ананьев и др., 2022].

Покмарки имеют, как правило, эллиптическую или круглую форму при диаметре от 10 до 250 м и глубине от 1 до 25 м. Иногда встречаются покмарки в диаметре более одного километра.

Образование покмарков связывают с выбросом газа, главным образом метана, из осадков на поверхность морского дна [Hovland, Judd, 1988]. Такая модель формирования покмарков представлена на рис. 1. Предполагается, что накопление газа, поднимающегося к верхней части осадочного чехла, приводит к образованию в осадочном слое областей с аномальным поровым давлением (рис. 1а). В конечном итоге давление поровой жидкости приводит к разрушению осадка и его быстрому вытеснению (рис. 1б). Далее газ, вода и осадок выбрасываются в толщу воды и переносятся течениями (рис. 1в).

Выброс метана может происходить за счет разложения газовых гидратов [Kennet et al., 2003]. Рассмотрим более подробно эту возможность. Будем исходить из того, что значительные залежи

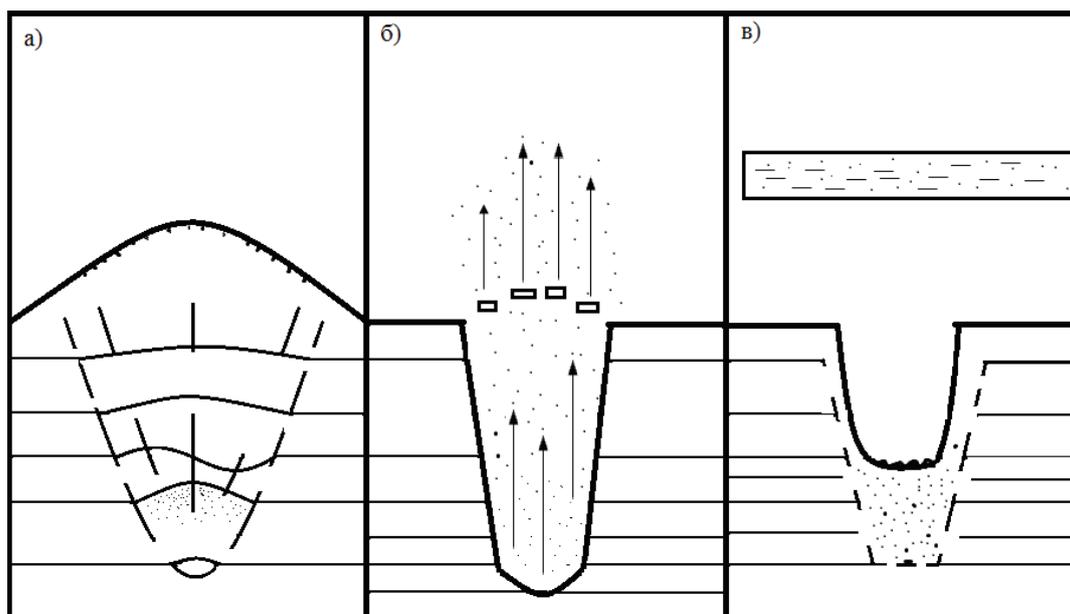


Рис. 1. Модель образования покмарков по [Hovland, Judd, 1988]

газогидратов находятся на небольших глубинах под морским дном в метастабильном состоянии. Проникновение потоков нагретого газа с большой глубины по ослабленным разломным зонам может вызвать бурное фазовое превращение в газогидратном включении. В пользу такого предположения свидетельствует утверждение о том, что активность покмарков контролируется наличием активных разломов [Баранов и др., 2011]. В результате резкого повышения порового давления в пределах газогидратного включения должно произойти ослабление придонных грунтов и возрастание нагрузки на перекрывающую толщу. Разрушение верхней покрывки приведет к выбросу грунта и образованию конической впадины (покмарка). Заметим, что механизм образования покмарка аналогичен тому, который привел к образованию воронки, обнаруженной в 2014 г. на полуострове Ямал южнее Бованенковского месторождения [Богоявленский, Гарагаш, 2015].

### Модель деформирования верхнего слоя осадков

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

Процесс разрушения происходит в придонной осадочной толще. Хорошим приближением к реальности для такого материала является модель нелинейной ползучести в сочетании с критерием прочности, зависящим от внутреннего трения. Поэтому для расчета выбраны определяющие соотношения для упруго-вязко-пластической среды со степенным законом ползучести, зависящим от температуры. Для описания разрушения среды используется закон неассоциированного пластического течения с предельным условием Друкера–Прагера [Drucker, Prager, 1952] и разупрочнением. Разупрочнение среды ведет к развитию неустойчивости вязкопластического течения и локализации сдвиговой деформации в узких зонах [Гарагаш, Николаевский, 1989], по которым и происходит разрушение.

Для описания нелинейного поведения предлагается использовать упруго-вязко-пластическую модель, схематически показанную на рис. 2.



**Рис. 2.** Упруго-вязко-пластическое поведение моделируется последовательным соединением вязкого и упругого элементов с элементом сухого трения

Полная скорость деформации при этом представляет собой сумму упругой  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ , вязкой  $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$  и пластической составляющих  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ ,

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^c + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (1)$$

Приращения упругих деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$  и приращения напряжений  $\dot{\sigma}_{ij}$  связаны соотношениями закона Гука

$$\dot{\sigma}_{ij} = E_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}^e, \quad (2)$$

где матрица жесткостей

$$E_{ijkl} = G[(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj}) + (\frac{K}{G} - \frac{2}{3})\delta_{kl}\delta_{ij}]. \quad (3)$$

Здесь  $G$  – модуль сдвига,  $K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$  – модуль объемного сжатия,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Для описания вязкого течения используется степенной закон ползучести, зависящий от температуры и связывающий между собой интенсивности девиатора скоростей деформаций

$$\Gamma = [2(\dot{\varepsilon}_{ij}^c - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}^c\delta_{ij})(\dot{\varepsilon}_{ij}^c - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}^c\delta_{ij})]^{1/2} \quad (4)$$

и интенсивность девиатора напряжений

$$T = [(\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij})(\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij})]^{1/2} \quad (5)$$

соотношением

$$\Gamma = D\sigma^n \exp(-Q/RT). \quad (6)$$

Объемная деформация линейно зависит от средних напряжений

$$\sigma_{kk} = 3K\varepsilon_{ii}^e. \quad (7)$$

Здесь  $D$  – константа,  $\rho$  – плотность,  $R = 1.987$  – газовая константа,  $T$  – температура,  $n$  – показатель степени,  $Q$  – энергия активации.

Пластическое деформирование матрицы наступает при выполнении предельного условия для сдвиговых напряжений

$$\tau + \alpha\sigma - c = f, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения,  $c$  – сцепление;  $\sigma = \sigma_{nn}/3$  – среднее напряжение;  $\tau = (\tau_{ij}\tau_{ij}/2)^{1/2}$  – интенсивность напряжений;  $\tau_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma$  – компоненты девиатора напряжений;  $f$  – функция упрочнения.

Здесь [Гарагаи, Николаевский, 1989]

$$f = \int_{\gamma^p} Hd\gamma^p + \int_{\alpha} \sigma' d\alpha + Y \quad (9)$$

функция упрочнения, зависящая от модуля пластического упрочнения  $H$  и интенсивности скорости пластической деформации сдвига

$$\dot{\gamma}^p = (2\dot{\gamma}_{ij}^p \dot{\gamma}_{ij}^p)^{1/2}, \quad \dot{\gamma}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\varepsilon}^p, \quad \dot{\varepsilon}^p = \frac{1}{3} \delta_{kl} \dot{\varepsilon}_{kl}^p. \quad (10)$$

Здесь  $\dot{\varepsilon}^p = \frac{1}{3} \delta_{kl} \dot{\varepsilon}_{kl}^p$  – средняя скорость деформации, в общем случае связанная с интенсивностью скорости пластической деформации сдвига дилатансионным соотношением [Николаевский, 1996]

$$\dot{\varepsilon}^p = \Lambda \dot{\gamma}^p, \quad (11)$$

где  $\Lambda$  – коэффициент дилатансии.

Используя неассоциированный закон пластического течения

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (12)$$

где  $\lambda$  – функция напряженно-деформированного состояния и пути нагружения, получим определяющие соотношения в виде:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{1}{H} \left( \frac{\tau_{ij}}{\tau} + \frac{1}{3} \Lambda \delta_{ij} \right) \left( \frac{\tau_{kl}}{\tau} + \frac{1}{3} \alpha \delta_{ij} \right) \dot{\sigma}_{kl}. \quad (13)$$

Обращая соотношение (13) и используя закон Гука (2), окончательно запишем определяющие соотношения в виде:

$$\dot{\sigma}_{ij} = E_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}, \quad (14)$$

где

$$E_{ijkl} = G \left\{ [(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{kj}) + \left( \frac{K}{G} - \frac{2}{3} \right) \delta_{ij} \delta_{kl}] - \frac{G}{(H+G) + \alpha \Lambda K} \left( \frac{\tau_{ij}}{\tau} + \frac{K}{G} \Lambda \delta_{ij} \right) \left( \frac{\tau_{kl}}{\tau} + \frac{K}{G} \alpha \delta_{kl} \right) \right\}, \quad K = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G. \quad (15)$$

Деформируемая среда, моделируемая FLAC<sup>3D</sup> [Itasca, 2006], в каждый момент времени должна удовлетворять уравнениям движения

$$\sigma_{ij,j} + M_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (16)$$

и определяющим соотношениям (6, 7, 15).

Здесь  $M_i$  – массовые силы,  $u_i$  – смещения.

Сначала среда деформируется упруго, но после выполнения предельного условия (8) к упругим и вязким деформациям добавляется пластическая составляющая. Неупругое деформирование осадочных пород сопровождается разупрочнением и появлением падающей ветви диаграммы деформирования [Jaeger et al., 2007]. Разупрочнение среды ведет к развитию неустойчивости пластического течения и локализации сдвиговой деформации в узких зонах, по которым в конечном итоге и происходит разрушение. В работе [Гарагаш, 2012] процесс локализации осадочной толщи, насыщенной газогидратами, изучен в рамках упругопластической разуплотняющейся среды (*strain softening model*) без учета вязкости.

Поскольку на падающей ветви диаграммы деформирования происходит уменьшение предела прочности, при расчетах предполагается, что сцепление уменьшается и является функцией накопленной пластической деформации  $c = c(\gamma^p)$ .

### Численное моделирование процесса формирования покмарков

На основе изложенных выше представлений о механизме формирования покмарков выполним численное моделирование разрушения верхнего слоя осадков, приводящих к образованию конических впадин в результате повышения порового давления в газогидратных включениях. Расчетная схема показана на рис. 3а.

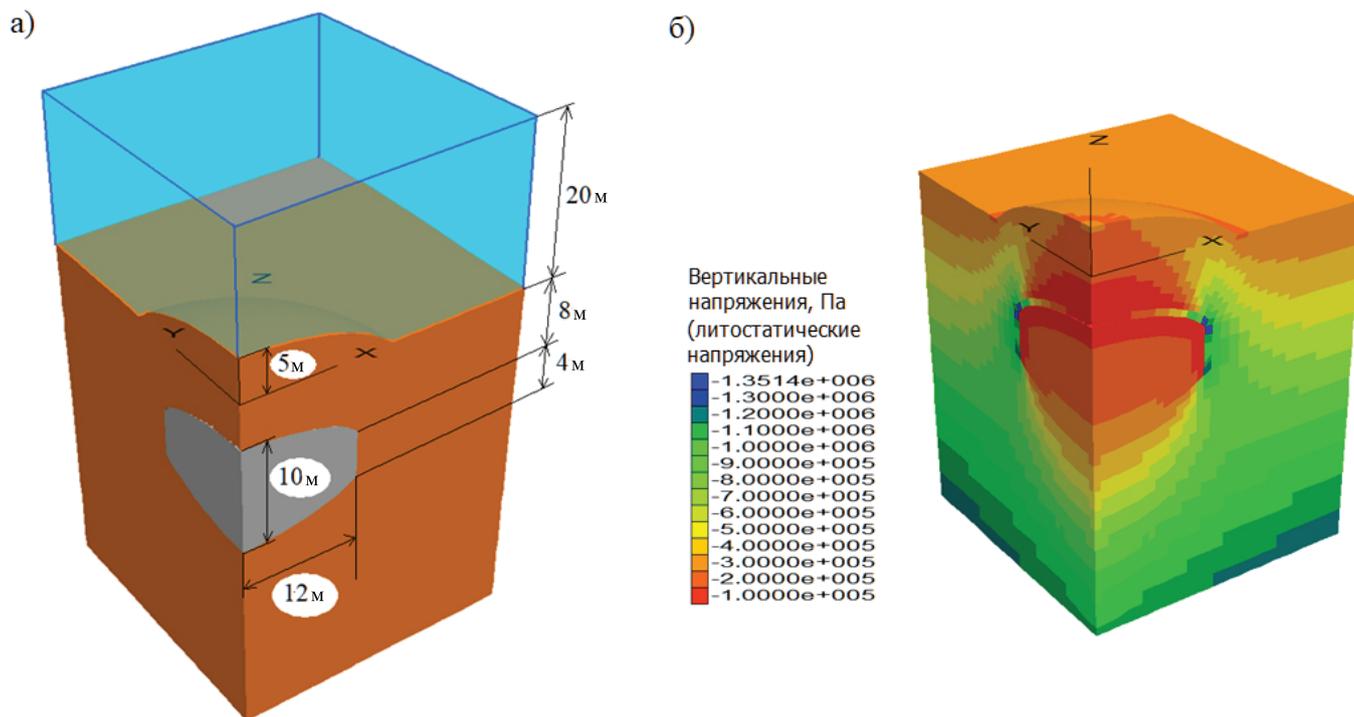


Рис. 3. Расчетная схема (а) и начальное распределение литостатического давления (б)

Предполагается, что вблизи дна в осадочной толще на глубине 8 м расположено газогидратное включение овальной формы с радиусами 12 и 5 м. Глубина моря составляет 20 м.

Для моделирования свойств осадков воспользуемся моделью нелинейной ползучести в сочетании с критерием прочности, зависящим от внутреннего трения. Материал включения моделируется упругопластической средой с разупрочнением. За основу для выбора параметров упругости и прочности использованы данные о механических свойствах пород [Гарагаш, 2012] с максимальным сцеплением  $c_{\max} = 3 \cdot 10^6$  Па и углом трения  $\varphi_{\max} = 20^\circ$ .

Предполагается, что поровое давление  $p$  в газогидратном включении повышается до заданного уровня. Связано это может быть с развитием медленных тектонических процессов, которые в определенный момент могут создать условия для увеличения проницаемости субвертикальных трещин и разломов, подходящих к поверхности, по которым возможна миграция потоков нагретого газа с большой глубины, вызывающих бурное фазовое превращение в газогидратном включении. Этот процесс происходит, поскольку поровое давление во включении возрастает, нагрузка на покрывку увеличивается, что и приводит к ее разрушению.

К моменту начала процесса разрушения осадочная толща находится в сложном напряженном состоянии. На рис. 3б показано начальное распределение литостатического давления,

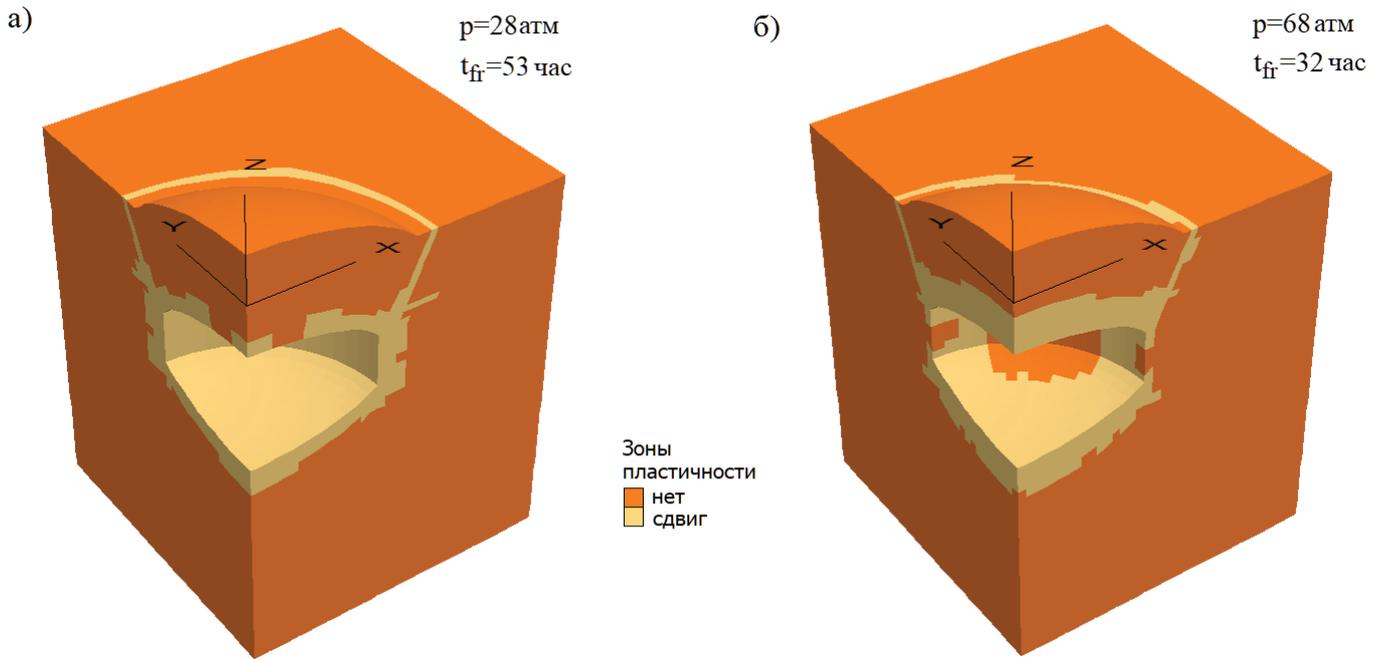


Рис. 4. Зоны локализованного пластического течения для поровых давлений  $p = 28$  атм (а) и  $p = 68$  атм (б)

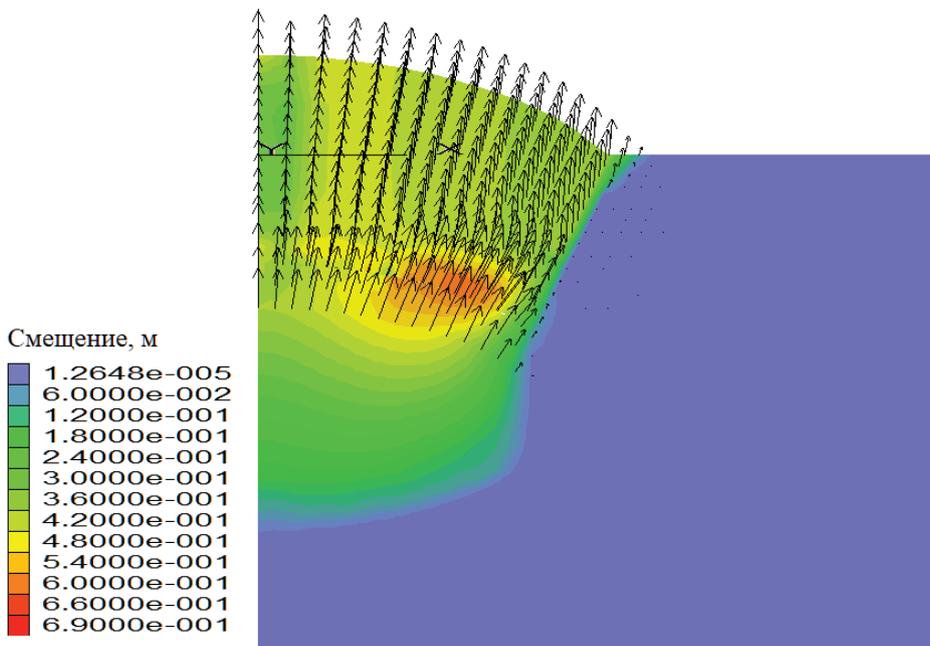
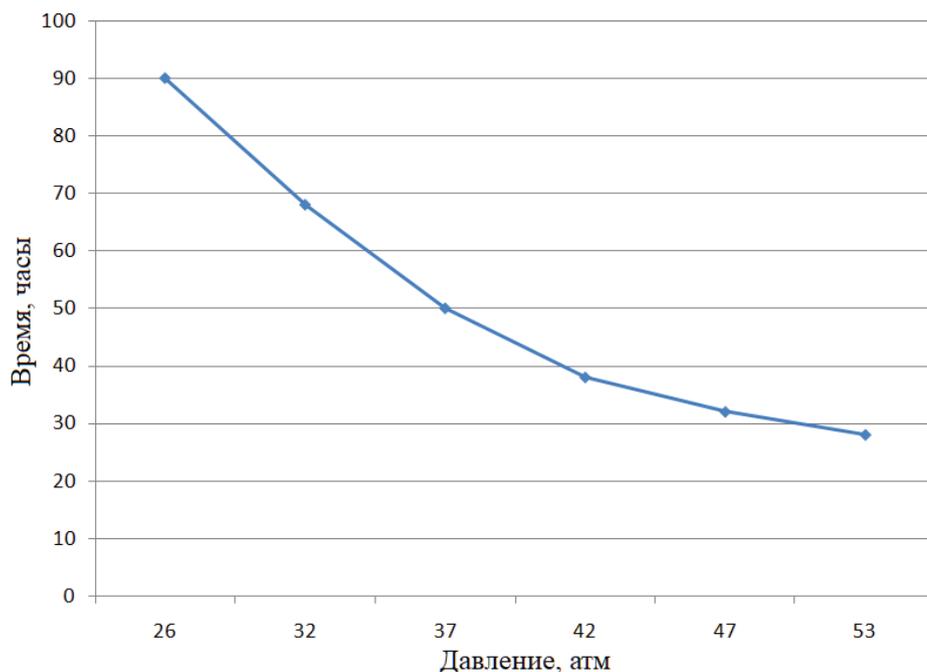


Рис. 5. Движение пробки вверх после формирования зон локализованного пластического течения

сформировавшегося под действием сил собственного веса и веса водной толщи. Повышение порового давления во включении приводит к развитию ползучести в покрышке и разупрочнению породы. Сдвиговая деформация начинает локализоваться на внутреннем контуре покрышки, а затем движется вверх, образуя коническую узкую зону, охватывающую покрышку, пока не выходит на дно. При этом сцепление в сформировавшейся конической зоне падает до нуля и сила, создаваемая давлением, выталкивает материал на поверхность, завершая образование покмарка. С зонами нулевого сцепления совпадают зоны локализованного пластического течения (рис. 4) для поровых давлений  $p = 28$  атм (рис. 4а) и  $p = 68$  атм (рис. 4б). Как видно, с увеличением давления время на формирование конической пробки ( $t_{fr}$ ) сокращается. После того как произошло формирование конической пробки начинается ее перемещение вверх, как это показано на рис. 5. Видно, что пробка выталкивается вверх.



**Рис. 6.** Зависимость времени формирования конической поверхности разрушения от давления во включении  $p$

Время формирования конической поверхности зависит от порового давления во включении  $p$ . Согласно графику на рис. 6 при давлении 26 атм время разрушения составляет 90 часов. При увеличении давления до 53 атм это время нелинейно падает до 28 часов. Если давление не превышает 10 атм, то напряжения в покрывке не достигают предела прочности, деформации остаются упругими, поверхность разрушения не формируется и покмарк не образуется.

Таким образом, можно сделать вывод, что уменьшение давления замедляет процесс разрушения.

### Заключение

Анализ развития деформаций породы, перекрывающий газогидратное включение, показал, что образование конических впадин (покмарков) связан с локализацией сдвиговой деформации на внутреннем контуре куполовидной покрывки, образующей коническую узкую зону, выходящую на дневную поверхность. Поскольку сцепление в конической зоне падает до нуля и сила, создаваемая поровым давлением, превышает вес покрывки, материал выталкивается на поверхность и происходит образование воронок.

### Финансирование

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

### Список литературы

- Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Семилетов И.П. Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 151–157. <https://doi.org/10.31857/S0030157422010014>
- Баранов Б.В., Дозорова К.А., Саломатин А.С. Покмарки восточного склона острова Сахалин // *Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. 2011. № 2. Вып. 18. С. 31–43. <https://www.elibrary.ru/owwxdx>
- Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // *Бурение и нефть*. 2014. № 9. С. 13–18. <https://www.elibrary.ru/qrmphl>
- Богоявленский В.И., Гарагаи И.А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // *Арктика: экология и экономика*. 2015. Т. 3. № 19. С. 12–17. <https://www.elibrary.ru/ungolz>

Гарагаш И.А. Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемерзлых и гидратосодержащих породах // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2012. Выпуск 2. № 6. С. 23. <https://www.elibrary.ru/sikdrn>

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. № 1. С. 36–45. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-36-45>

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

Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М. : Недра. 1992. – 236 с.

Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М. : Недра. 1996. – 446 с.

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

Davidson D.W., Garg S.K., Gough S.R. et al. Laboratory analysis of naturally occurring gas hydrate from sediment of the Gulf Mexico // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1986. Vol. 50. P. 619–623. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90110-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90110-9)

Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10 (2). P. 157–165.

Hovland M., Judd A.G. Seabed Pockmarks and Seepages. London: Graham and Trotman. 1988. – 293 p.

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

Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics, Wiley-Blackwell. Oxford. 2007. – 475 p.

Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow, the impact on geology, biology and the marine environment. UK: Cambridge University Press. 2007. – 475 p.

Kennett J., Cannariato K.G., Hendy I.L. et al. Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: the Clathrate Gun Hypothesis. Washington DC. American Geophysical Union. 2003. – 202 p.

## **NUMERICAL MODELING OF THE FORMATION OF POCKMARKS ON THE SEABED AS A RESULT OF DECOMPOSITION OF GAS HYDRATES**

© 2024 **I. A. Garagash<sup>1,2,\*</sup>, L. I. Lobkovsky<sup>3</sup>, I. P. Semiletov<sup>4</sup>**

*<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*<sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

*\*E-mail: garagash@ifz.ru*

A geomechanical model of pockmark formation on the seabed resulting from gas hydrate decomposition has been developed. The process of destruction and formation of pockmarks occurs in a medium whose behavior is described by a nonlinear creep model combined with a yield criterion dependent on internal friction. Constitutive relations for an elastic-viscous-plastic medium with a temperature-dependent power law of creep are used. The law of non-associated plastic flow with the Drucker–Prager limit condition and softening is used to describe the destruction of the medium. Softening leads to the development of instability of viscoplastic flow and localization of shear deformation in narrow zones, along which destruction occurs. Analysis of the development of deformations and stresses showed that shear deformation is localized on the inner contour of the dome-shaped cap, forming a narrow conical zone. After it reaches the surface, cohesion drops to zero and the pressure pushes the material to the surface, completing the formation of a crater. The time it takes for the conical surface to form depends on the pore pressure in the inclusion. If the pressure does not exceed the critical value, the stresses in the cap do not reach the strength limit, the fracture surface does not form, and the pockmark does not form.

**Keywords:** pockmark, gas hydrates, elastic-viscous-plastic medium with softening, instability, deformation localization.