

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВОРОНКИ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

В. Н. Одинцев¹, В. А. Трофимов¹, Ю. А. Филиппов¹, И. Е. Шиповский¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация: Природа образования гигантских кратеров на земле Ямала до последнего времени остается не окончательно выяснена. Предлагались теории выброса большого объема мерзлой почвы и льда под действием усиления таяния верхней части вечной мерзлоты вследствие аномального потепления. Позднее группой В. И. Богоявленского выдвинута другая гипотеза, связанная с естественным газодинамическим механизмом, толкающим газ из области высоких давлений в область низких, то есть к поверхности земли. Была сформулирована и опубликована модель с газонасыщенной термокарстовой полостью в толще льда. Согласно этой модели, накопление газа, повышение давления и развитие газодинамических процессов в полости приводят к ее взрыву и образованию кратера. Авторами настоящей статьи в качестве изучения одной из возможных гипотез образования таких воронок предлагается использовать геомеханический подход. Этот подход основан на эволюции напряженно-деформированного состояния массива в зоне вечной мерзлоты за счет развития процесса трещинообразования, вызванного совокупностью многих факторов, наиболее существенным из которых является разложение газогидратов. При климатическом или техногенном повышении температуры криолитовой зоны разложение газогидратов сопровождается образованием большого количества свободного метана, который может влиять на геомеханические процессы. Данные, полученные в процессе компьютерного моделирования, показывают, что используемая компьютерная модель обладает качествами, необходимыми для адекватного описания трещинообразования в геосреде, и допускает как динамический режим развития геопроцессов, так и квазистатический режим с постепенным выходом метана по локальным трещинам в приповерхностной области.

Ключевые слова: вечная мерзлота, подземная полость, выброс газа, кратер, разложение газогидратов, метан, геомеханический подход, трещинообразование, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Одинцев В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Шиповский И. Е. Геомеханическая модель образования воронки на земной поверхности в зоне вечной мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 159–166. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_159.

Geomechanical model of formation of sinkholes on ground surface in the permafrost zone

V. N. Odintsev¹, V. A. Trofimov¹, Yu. A. Filippov¹, I. E. Shipovskii¹

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Abstract: The nature of giant craters formed on ground surface on the Yamal Peninsula remains yet unclear. The theories which were put forward suggested large volume ejection of frozen soil and ice under the action of top permafrost thawing because of anomalous climate warming. Bogoyavlensky's group set forth a hypothesis on natural gas-dynamics mechanism which pushed gas from the high pressure areas to the low pressure areas, i.e. toward ground surface. Furthermore, a model of gas-saturated frost-thaw cavity in the ice sheet was formulated and published. According to this model, accumulation of gas and the gas pressure increase induces gas-dynamic processes in the cavity, which leads to explosion and formation of a crater. The authors of this paper suggest a geomechanical approach to the hypothesis of formation of sinkholes. This approach is based on the stress-strain behavior evolution in permafrost rock mass owing to fracturing process caused by an aggregate of many factors with the most essential effect exerted by decomposition of gas-hydrates. Under natural or induced increase of temperature in the permafrost zone, decomposition of gas-hydrates is accompanied by generation of much amount of free methane which can have influence geomechanical processes. The computer modeling data prove that this approach-based model enables adequate description of fracturing processes in geomedium, and concedes both dynamic and quasi-static behavior of geo-processes with gradual liberation of methane along local subsurface fractures.

Key words: permafrost, underground cavity, gas emission, crater, gas-hydrate decomposition, methane, geomechanical approach, fracturing, computer modeling.

For citation: Odintsev V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Shipovskii I. E. Geomechanical model of formation of sinkholes on ground surface in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12-1):159–166. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_159.

Введение

Для экологической и экономической безопасности России необходимо решение задач рационального природопользования в арктических условиях в соответствии со «Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года» [1]. Среди опасных природных и техногенных угроз при освоении территории в криолитозоне особое место занимают выбросы породы и газа с образованием характерных воронок на земной поверхности, глубина и диаметр которых могут достигать несколько десятков метров (рис. 1) [2–5].

Несмотря на развитие разнонаправленных исследований по геопроцессам в криолитовой зоне [1–8], природа выбросов породы и газа с образованием воронок (в ряде работ они называются кратерами) остается невыясненной. В работе [1] отмечается, что исследования должны иметь геофизическую

инструментальную направленность. Однако мы считаем, что геомеханические исследования с количественными оценками также могут способствовать выявлению более объективной картины подготовки и протекания этих явлений.

К настоящему времени доминирует представление о газодинамической природе геопроцессов, приводящих к выбросам породы и газа (метана). Существуют четыре основные гипотезы о природе метана, определяющие эти процессы: 1) образование воронок связывают с разрушением газогидратов и образованием свободного метана на глубине несколько десятков метров вследствие повышения температуры криолитозоны; 2) выбросы связаны с глубинным газом, который под давлением в пластах многолетнемерзлых пород мигрирует, накапливается в подходящих для этого ловушках, а при достижении критического давления прорывается на земную поверхность; 3) метан

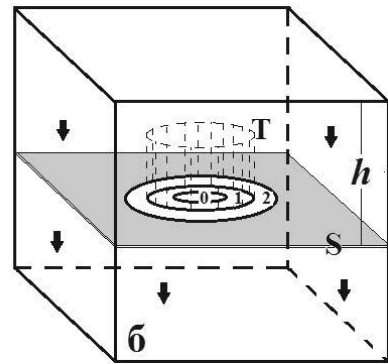


Рис. 1. Образование воронок в криолитозоне: а — одна из воронок на полуострове Ямал [1] (вид с вертолета); б — схема к постановке геомеханической задачи

Fig. 1. Formation of craters in the cryolithozone: а — one of the craters on the Yamal Peninsula [1] (view from a helicopter); б — a scheme for setting a geomechanical problem

накапливается в ловушках вследствие биохимического процесса с участием микроорганизмов; 4) метан имеет смешанное происхождение. В каждой из гипотез не ясна в полной мере природа образования ловушек газа.

В настоящей работе мы рассматриваем один из факторов — разложение газогидратов [6–8]. При климатическом или техногенном повышении температуры криолитовой зоны разложение газогидратов сопровождается образованием большого количества свободного метана, который может влиять на геомеханические процессы.

Постановка задачи модельных геомеханических исследований. Рассматривается полупространство со свойствами упругой среды, нагруженное собственным весом при плотности пород 2000 кг/м^3 . Напряженное состояние нетронутой среды отвечает гипотезе академика А. Н. Динника. Модуль упругости среды, представляющей породу, принимается равным μ , коэффициент Пуассона ν . Полагаем, что на глубине находится горизонтальный слой S , содержащий газогидраты. Пусть в этом слое имеется небольшое природное нарушение в виде горизонтальной трещины с частично сомкнутыми бере-

гами, в плане имеющей вид эллипса (рис. 2, контур 0). При изменении температуры среды в этом нарушении газогидраты разлагаются на составные компоненты с образованием свободного метана. Если давление свободного метана превысит давление 0.65 МПа , природное нарушение раскрывается по всей своей площади с образованием открытой трещины.

При развитии трещины в пласте процесс разложения газогидратов затрагивает новые области пласта, сохраняя давление свободного метана и поддерживая тем самым развитие трещины. В оценках критерия и направления развития трещины используется процедура, аналогичная описанной в работах [9, 10]. Как следует из теории трещин и расчетов, конфигурация трещины изменяется — трещина приобретает круговую форму.

Решение пространственной упругой осесимметричной задачи проводится на основе суперпозиции плоских решений [11, 12]. Такой подход позволяет детально анализировать решения соответствующих плоских задач и делать количественные оценки, мало отличающиеся от точного осесимметричного решения.

Расчеты развития трещины

В расчетах определены закономерности изменения напряженного состояния среды с учетом критерия развития трещины и с оценкой направления развития трещины. Расчеты показали, что если выполняются два условия — давление свободного метана превышает 2 МПа (что соответствует данным о разложении газогидратов), а радиус горизонтальной круговой трещины превышает 9 м, то вблизи границы горизонтальной трещины возможно зарождение и развитие цилиндрической вертикальной трещины (на рис. 1, б горизонтальной трещине соответствует контур 1, штриховыми линиями отмечен контур вертикальной трещины).

Цилиндрическая трещина должна развиваться по механизму сдвига, при этом берега образующейся трещины должны расходиться за счет давления заполняющего ее метана. На рис. 2 а, б показано соответствующее плоское распределение напряжений, которое в количественном отношении отличается от осесимметричного не более, чем на 20%. Этот рисунок соответствует длине вертикальной трещины 2 м.

Из расчетов следует важный вывод — при давлении метана более 2.0 МПа возможно одновременное развитие как вертикальной цилиндрической трещины к земной поверхности, так и неограниченное квазистатическое расширение горизонтальной трещины в пласте. Сохранение давления газа в горизонтальной трещине, несмотря на увеличение ее объема, обеспечивается процессом разложения газогидратов.

При развитии цилиндрической вертикальной трещины давление газа снизу на формирующийся породный цилиндр сохраняется, однако сопротивление его сдвигению уменьша-

ется вследствие утонения части среды вблизи дневной поверхности, которую условно можно назвать «пробкой», обозначенной на рис. 3, а буквой .

На рис. 3, а показано распределение горизонтальных напряжений при мощности пробки = 6 м, что позволяет оценить деформационные геопроцессы в «пробке» в предвыбросной стадии. Например, наличие существенных растягивающих напряжений указывает на возможность перехода «пробки» в полуразрушенное состояние с образованием локальных трещин отрыва, выходящих на дневную поверхность. Они могут быть каналами для локального просачивания газа. Также можно заключить, что при критических растягивающих напряжениях «пробка» должна деформироваться нелинейным образом с развитием неупругих деформаций.

На рис. 3, б представлены результаты расчета вертикальных смещений точек среды при той же мощности пробки. Расчеты проведены по упругой модели, которая дает заведомо низкие значения смещений и деформаций. Реальные смещения точек поверхности могут быть на порядок больше.

Результаты расчетов

Основные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния среды можно сформулировать следующим образом: 1) при разложении газогидратов возможно развитие горизонтальной трещины отрыва (главной ловушки газа) и сдвиговой вертикальной цилиндрической трещины вплоть до поверхности; 2) «пробка», отделяющая дневную поверхность от внутренней области высокого давления метана, должна иметь нелинейный характер деформирования с развитием существенных горизонтальных и вертикальных деформаций; 3) заключи-

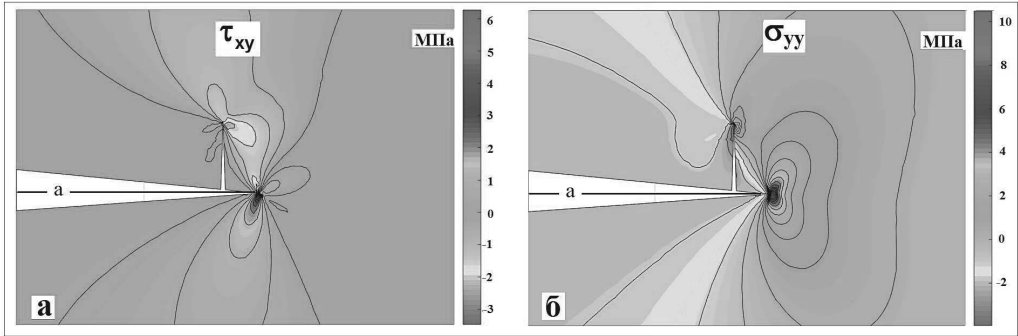


Рис. 2. Зарождение и развитие вертикальной трещины по механизму сдвига, развитие горизонтальной трещины по механизму отрыва: а — распределение касательных напряжений вблизи конца вертикальной трещины, б — распределение вертикальных напряжений вблизи конца горизонтальной трещины

Fig. 2. The origin and development of a vertical crack by the shear mechanism, the development of a horizontal crack by the separation mechanism: a — the distribution of tangential stresses near the end of the vertical crack, b — the distribution of vertical stresses near the end of the horizontal crack

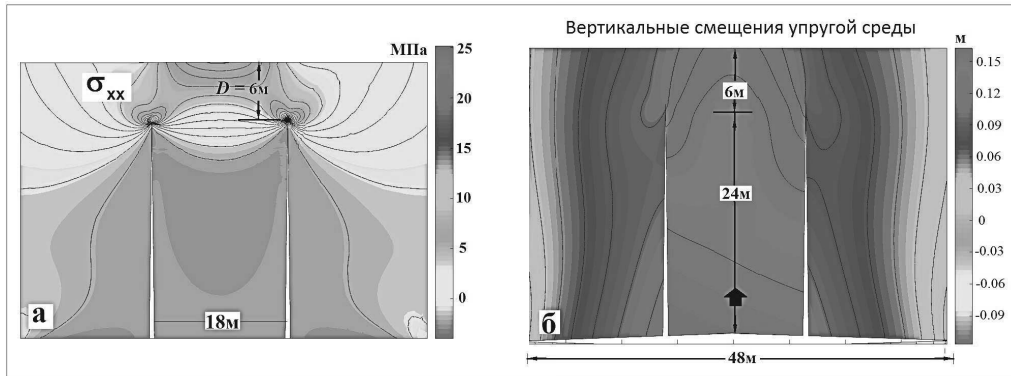


Рис. 3. Некоторые результаты геомеханических расчетов: а — горизонтальные напряжения «пробки» при протяженности вертикальной цилиндрической трещин 24 м; б — вертикальные смещения упругой среды

Fig. 3. Some results of geomechanical calculations: a — horizontal stresses of the «plug» at the length of the vertical cylindrical cracks of 24 m; b — vertical displacements of the elastic medium

тельная стадия развития цилиндрической трещины должна определяться динамическим режимом ее развития, что задает начало выброса породы и газа.

Оценочный расчет возможности выброса породы из воронки

В оценке полагаем, что породный цилиндр как бы выталкивается на дневную поверхность подобно

движению поршня за счет давления на него газа снизу. Давление газа должно быть достаточным для подъема цилиндра на высоту 30 м. Нетрудно подсчитать, что давление газа, которое может вытолкнуть цилиндр, должно удовлетворять соотношению . Максимальное давление сжатого метана перед выбросом полагаем равным . Объем полости, заполняемый сжатым метаном, определяется, главным обра-

зом, объемом горизонтальной круговой трещины (контур 2 на рис. 1, б). Этот объем для осесимметричной плоской трещины радиуса r , раскрываемой давлением p , описывается соотношением:

Максимальный объем полости на момент полного поднятия породного цилиндра определяется объемом воронки в совокупности с объемом горизонтальной трещины радиуса r , раскрываемой давлением газа p . Критический радиус круговой горизонтальной трещины, способной обеспечить выброс цилиндра, можно оценить из соотношения Бойля-Мариотта для идеального газа. Используя это соотношение, находим, что радиус горизонтальной трещины, которая содержит сжатый метан, способный вытолкнуть породный цилиндр на поверхность, приблизительно равен 55 м.

Ясно, однако, что породный цилиндр при движении вверх не может сохраниться как целое. При движении он последовательно разрушается вблизи дневной поверхности как за счет особенностей напряженного состояния, что следует из расчетов, так и за счет газодинамического фактора, связанного с десорбцией метана из фильтрационных каналов.

Краткое обсуждение результатов

Проведенные расчеты показали, что геомеханическая модель, с учетом фактора разложения газогидратов, способна объяснить важные особенности образования воронок. Из этой модели, в частности, следует возможность образования двух больших трещин отрывного и сдвигового типа с характерным размером несколько десятков метров. Трещина отрыва объясняет круговую форму воронки и образование ловушек газа большого объема, причем при давлении, достаточном для сдвижения породы и ее разрушения. Трещина сдвига объясняет гладкие стенки нижней части воронки за счет сдвига-скольжения.

Эта модель допускает как динамический режим развития геопроцессов, так и квазистатический режим с постепенным выходом метана по локальным трещинам в приповерхностной области. Необходима последующая доработка модели на основе междисциплинарного подхода с учетом физико-химических и фильтрационных процессов, связанных с разложением газогидратов и движением метана в среде.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Богоявленский В. И.* Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — №9. — С.13–18.
2. *Богоявленский В. И.* Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. — 2020. — №1. — С.97–118.
3. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing. *Geosciences* 2021, 11, 71
4. *Хименков А. Н., Станшловская Ю. В.* — Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. — 2018. — № 3. — С. 1–25.
5. *Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Лейбман М. О., Зимин М. В., Хомутов А. В.* Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. No 2. . 15–25.

6. Перлова Е. В., Микляева Е. С., Леонов С. А., Ткачёва Е. В., Ухова Ю. А. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона. // Вести газовой науки. 2017. № 3 (31). С. 255–262.
7. Истомин В. А., Нестеров А. Н., Чувилин Е. М., Квон В. М., Решетников А. М. Разложение гидратов различных газов при температурах ниже 273К // Газохимия. 2008. № 3. С. 30–44.
8. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate Histories – Beaufort Mackenzie Basin // Canada Energies. 2015. V8. Pp, 6738–6764.
9. Одинцев В. Н., Милетенко Н. А. Прорыв воды в горные выработки как следствие самопроизвольного гидроразрыва массива пород // ФТПРПИ. 2015. № 3. С. 3–16.
10. Одинцев В. Н., Милетенко И. В., Милетенко Н. А. Новый геомеханический подход к прогнозу опасных гидрогеологических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. С. 103–108.
11. Александров А. Я., Соловьев Ю. И. Пространственные задачи теории упругости. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
12. Nikitin L. V., Odintsev V. N. Axisymmetric self-similar dynamic problem for an elastic half – space with mixed moving boundary conditions // Archives of Mechanics. – 1973. – Т. 25. – № 2. – С. 351–363. **MIAB**

REFERENCES

1. Bogoyavlenskiy V. I. Threat of catastrophic gas emissions from the permafrost zone of the Arctic. Funnels of Yamal and Taimyr. *Burenie i neft'*, 2014, no. 9, pp. 13–18. [In Russ]
2. Bogoyavlenskiy V. I. Natural and technogenic threats during the development of fossil fuels in the cryolithosphere of the Earth. *Gornaya promyshlennost'*, 2020, no. 1, pp. 97–118. [In Russ]
3. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing //Geosciences, 2021, no. 11, 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
4. Khimenkov A. N., Stanilovskaya Yu.V. Phenomenological model of the formation of gas ejection funnels on the example of the Yamal crater. *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 3, pp. 1–25. [In Russ]
5. Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Leibman M. O., Zimin M. V., Khomutov A. V. Geomorphological conditions for the formation of a gas outburst funnel and the dynamics of this form in central Yamal. *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. XIX, no. 2, pp. 15–25. [In Russ]
6. Perlova E. V., Miklyaeva E. S., Leonov S. A., Tkacheva E. V., Ukhova Yu.A. Gas hydrates of the Yamal Peninsula and the adjacent shelf of the Kara Sea as a complicating factor in the development of the region. *Vesti gazovoj nauki*, 2017, no. 3 (31), pp. 255–262. [In Russ]
7. Istomin VA, Nesterov AN, Chuvilin EM, Kvon VM, Reshetnikov AM Decomposition of hydrates of various gases at temperatures below 273K. *Gazohimiya*, 2008, no. 3, pp. 30–44. [In Russ]
8. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate Histories Beaufort Mackenzie Basin. *Canada Energies*, 2015, vol 8. pp. 6738–6764.
9. Odintsev V. N., Miletlenko N. A. Breakthrough of water into mine workings as a result of spontaneous hydraulic fracturing of rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 3–16. [In Russ]
10. Odintsev V. N., Miletlenko I. V., Miletlenko N. A. A new geomechanical approach to forecasting hazardous hydrogeological processes in underground mining of solid minerals. *MIAB. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 7, pp. 103–108. [In Russ]

11. Aleksandrov A. Ya., Solov'ev Yu. I. *Prostranstvennye zadachi teorii uprugosti* [Spatial problems of the theory of elasticity], Moscow: Nauka, 1978, 464 p. [In Russ]
12. Nikitin L. V., Odintsev V. N. Axisymmetric self-similar dynamic problem for an elastic half space with mixed moving boundary conditions. *Archives of Mechanics*, 1973, vol. 25, no 2, pp. 351 – 363.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Одинцев Владимир Николаевич*¹ — докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, odintsev.v@ipkonran.ru;

*Трофимов Виталий Александрович*¹ — докт. техн. наук, зав. лабораторией, trofimov.v@ipkonran.ru;

*Филиппов Юрий Алексеевич*¹ — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, shipovskiy_i@ipkonran.ru;

Шиповский Иван Евгеньевич — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, shipovskiy_i@ipkonran.ru;

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук 111020, Москва, Крюковский тупик, д. 4, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Odintsev V. N.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Principal Researcher, efremovtsev_n@ipkonran.ru;

*Trofimov V. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, trofimov.v@ipkonran.ru;

*Filippov Yu. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, filippov.yury@ipkonran.ru;

*Shipovskii I. E.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, shipovskiy_i@ipkonran.ru;

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Russia.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 18.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 18.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.

