

Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием

В. И. Богдавленский¹, член-корреспондент РАН
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН,
ФГБОУ ВПО Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина

И. А. Гарагаш², доктор физико-математических наук
ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Приведены результаты математического моделирования процесса образования кратеров (воронок) газового выброса в арктических условиях. В качестве фактологической основы выбрана воронка, обнаруженная в 2014 г. на полуострове Ямал южнее Бованенковского месторождения.

Ключевые слова: выбросы газа, кратеры, воронки газового выброса, полуостров Ямал, озера Ямала, криолитозона, многолетнемерзлые породы, Бованенковское месторождение, математическое моделирование.

Летом 2014 г. особое внимание научной общественности привлекла 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 (НГКМ), непосредственно над южной частью Муртинской газоперспективной (неразбуренной) структуры гигантского глубокого кратера типа воронки взрыва (В1), заполненного водой лишь в нижней части (рис. 1). Средние внутренний и внешний диаметр кратера составили 26 и 40 м, а его глубина — около 50 м (с учетом упавшей породы и воды). Вскоре появилась информация еще о шести подобных объектах, которым в формируемой Институтом проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН) геоинформационной системе

были присвоены индексы В2—В7. В 2014 г. по инициативе Правительства ЯНАО Российский центр освоения Арктики (РЦОА) организовал три экспедиции, давшие принципиально новую информацию о происходящих процессах. Большинство специалистов признало, что обнаруженные кратеры являются воронками газовых выбросов (пневматических взрывов — выхлопов) [1; 2; 3].

Экспедиционные и аналитические исследования с привлечением ретроспективных космоснимков объектов В1, В2, В3 и В4 [2; 3] позволяют утверждать о существовании на местах газовых выбросов бугров пучения (булгуннях — *pingo*), связанных с известными явлениями, происходящими в многолетнемерзлых породах (ММП). Незатопленные кратеры В1, В3 и В4 имеют субвертикальные гладкие стенки и приповерхностные зоны с конической неровной (рваной) поверхностью, характерной для разрыва твердых мерзлых пород. На основании анализа всей имеющейся информации у авторов данной работы

¹ e-mail: vib@pgc.su.

² e-mail: garagash@mail.ru.

сложилось мнение, что непосредственно перед выбросом газа в ММП существовала заполненная им полость, а выброшенная на поверхность Земли мерзлая порода до выброса формировала только выпуклую покрывку поло- го объекта в виде верхнего слоя мерзлых осадков, толщина которых на объекте В1 составляет около 8 м. Ориентировочный объ- ем породы, слагавшей покрывку, составляет 5,6—6,8 тыс. м³, при этом очевидно, что ее бoльшая часть после выброса газа упа- ла на дно кратера, закрыв воз- можный субвертикальный канал притока глубинного газа, нали- чие которого подтверждается по экспедиционным исследованиям РЦОА в ноябре 2014 г. — данным георадара «Грот-12Н» ЗАО «Тай- мер» (А. Е. Резников и др., 2014 г.). Наиболее вероятно, что газ, за- полнивший подземную первоначаль- но водонасыщенную полость в ММП, пришел в нее по систе- мам субвертикальных трещин и глубинных разломов, хотя не ис- ключается и разложение газогид- ратов за счет изменения термо- барических условий, связанных с повышенным потоком тепла из недр Земли, существование кото- рого в районах кратеров В1 и В2 доказано трехмерным модели- рованием на основе скважинных данных [1].

Гигантские размеры воро- нок газового взрыва породили у ряда исследователей мнение об огромной энергии, необходимой для произошедших разрушений. В связи с этим мы решили прове- сти трехмерное математическое моделирование образования по- добных объектов. На основе из- ложенных выше характеристик изучаемого объекта — воронки газового взрыва В1 для выпол- нения моделирования сформиро- вана следующая трехмерная мо- дель. Предполагается, что к по- верхности Земли подходит цилин- дрический канал диаметром 26 м, перекрытый сверху покрывкой толщиной 8 м. К моменту повыше- ния давления в канале за счет по- тока газа покрывка над каналом



Рис. 1. Гигантская воронка на полуострове Ямал (фото В. И. Богоявленского, 25 августа 2014 г.)

имеет форму полусферы с превышением над поверхностью земли на 5 м. Очевидно, что глубина канала на результаты моделирования не влияет. Расчетная схема модели показана на рис. 2а.

Трехмерное численное моделирование разрушения верхнего слоя осадков выполнено с использованием программного кода FLAC^{3D} [12], реализующего явную конечно-разностную 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.

Процесс разрушения происходит в толще, сложенной льдом и ММП. Хорошим приближением к реальности для такого материала является модель нелинейной ползучести в сочетании с критерием прочности, зависящим от внутреннего трения [10]. 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 [9] и разупрочнением. Разупрочнение среды ведет к развитию неустой- чивости вязкопластического течения и локализации сдвиговой дефор- мации в узких зонах [8], по которым и происходит разрушение (рис. 3). В качестве основы для выбора параметров упругости и прочности использованы данные о механических свойствах пород, характер- ных для Бованенковского НГКМ [7; 11], с максимальным сцеплением $c_{\max} = 3 \cdot 10^6$ Па и максимальным углом трения $\varphi_{\max} = 20^\circ$. В расчетах также учтено увеличение прочности породы с глубиной.

Предполагается, что давление в цилиндрическом канале (подзем- ная полость) быстро повышается до уровня $p = 30$ атм в течение по- лутора часов и далее не меняется. Это может быть связано с раз- витием медленных тектонических процессов, которые в определен- ный момент могут создать условия для увеличения проницаемости субвертикальных трещин и разломов, подходящих к поверхности, по которым возможна миграция газа из пород-коллекторов, распо- ложенных ниже многолетнемерзлых пород на глубине около 300 м

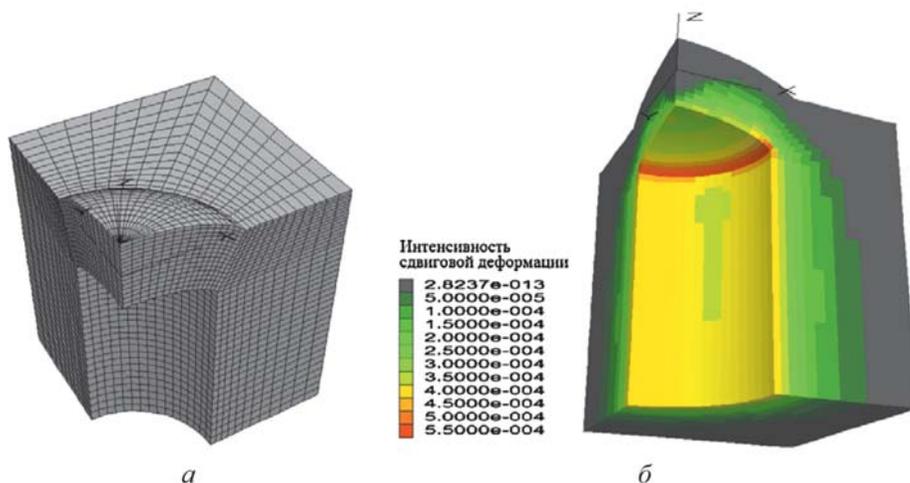


Рис. 2. Расчетная схема (а) и распределение интенсивности сдвиговой деформации к моменту возрастания давления до уровня $p = 30$ атм (б)

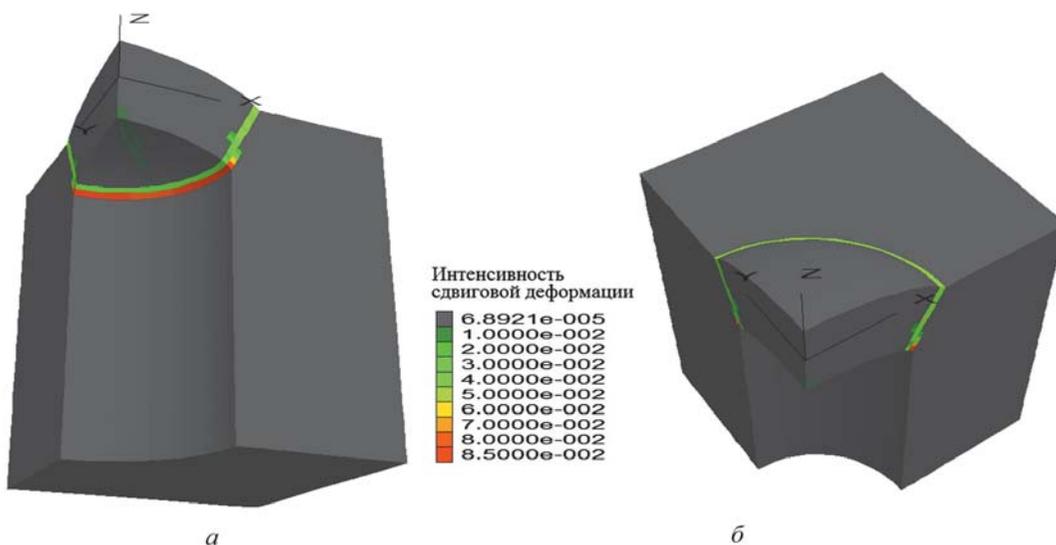


Рис. 3. Формирование конической поверхности разрушения покрывки

(гидростатическое давление 30 атм). К моменту установления постоянного давления распределение интенсивности сдвиговой деформации приобретает вид, показанный на рис. 2б. В результате развития ползучести многолетнемерзлой породы примерно через 4 ч интенсивность сдвиговой деформации начинает локализоваться в внутреннем контуре куполовидной покрывки, а затем еще примерно в течение 5 ч движется вверх, образуя коническую узкую зону, охватывающую покрывку, пока не выходит на дневную поверхность (рис. 3). После этого, поскольку сцепление в конической зоне падает до нуля и сила, создаваемая давлением, примерно в десять раз превышает вес покрывки, ничто не мешает выбросу материала на поверхность с образованием воронки и бруствера из выброшенной породы.

Кратеры других выявленных объектов на полуостровах Ямал и Гыданский отличаются рядом характеристик, из которых наиболее значимой представляется внутренний диаметр кратера (покрывки) или его радиус. Покажем, что чем больше радиус покрывки R , тем быстрее будет происходить разрушение по поверхности ее контакта с вмещающей породой. На рис. 4а показано действие распределенного давления p на поверхность S_1 и уравновешивающих его усилий F на конической поверхности разрушения S_2 .

Для простоты рассмотрим пластину с цилиндрической поверхностью (рис. 4б). В этом случае $S_1 = \pi R^2$, $S_2 = 2\pi R h$, и справедливо простое соотношение

$$pS_1 = S_2 F. \tag{1}$$

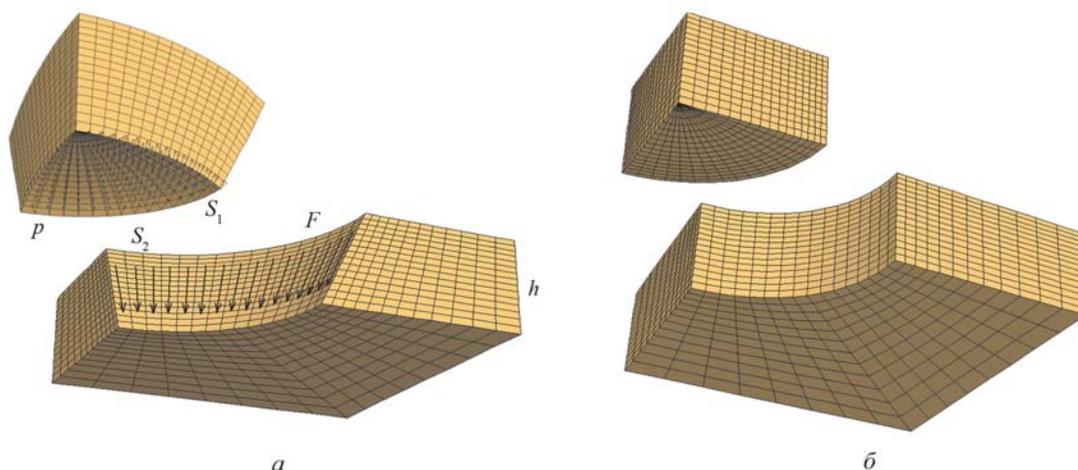


Рис. 4. Модель давлений в области покрывки

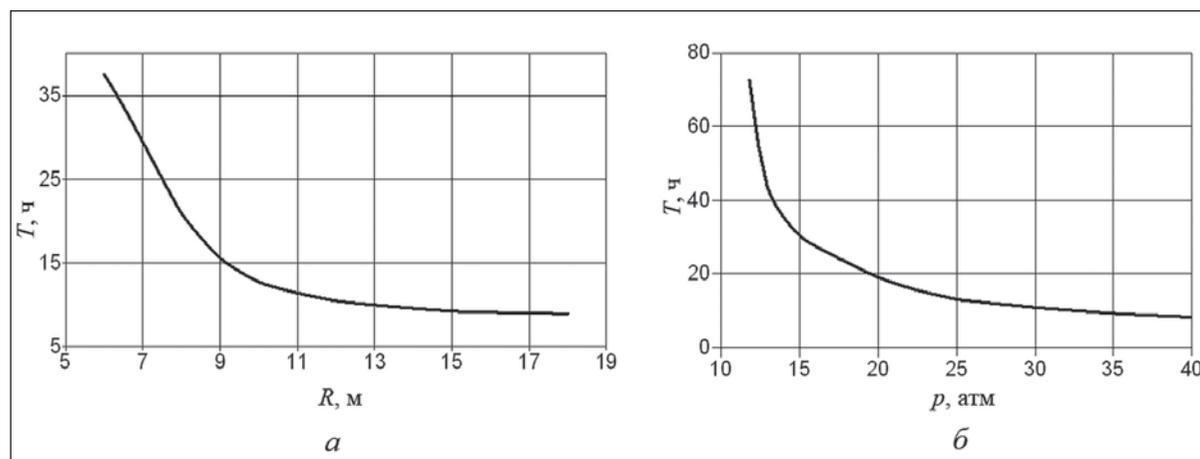


Рис. 5. Зависимость времени формирования конической поверхности разрушения T от давления в канале p (а) и радиуса канала R при $p = 30$ атм (б)

Из (1) следует, что

$$F = \frac{p}{2h} R. \quad (2)$$

Поскольку отношение $p/2h = \text{const}$, а усилие F возрастает пропорционально радиусу, становится очевидно, что вязкопластическое течение будет ускоряться по мере увеличения радиуса покрывки. Другими словами, формула (2) свидетельствует, что чем больше радиус (диаметр) подземной полости, тем меньшие давления могут разрушить покрывку.

Этот вывод подтверждается численными расчетами. На рис. 5а показано, как меняется время формирования конической поверхности разрушения T в часах в зависимости от радиуса канала R при фиксированном давлении $p = 30$ атм. Можно констатировать, что начиная с $R < 10$ м процесс разрушения быстро тормозится. Похожая нелинейная

зависимость связывает время разрушения T с давлением в канале p (рис. 5б). Согласно расчетам при заданных прочностных параметрах для разрушения покрывки модели воронки В1 достаточно давления даже в 12,5 атм. При этом время разрушения увеличивается до 80 ч, что на фоне медленно текущих геологических процессов принципиального значения не имеет. Однако дальнейшее уменьшение давления до уровня ниже $p < 11,8$ атм приводит к тому, что напряжения в покрывке не достигают предела прочности, деформации остаются упругими, поверхность разрушения не формируется и выброса породы не происходит.

Таким образом, можно сделать вывод, что графики на рис. 5 отражают ожидаемое поведение покрывки: уменьшение давления замедляет процесс разрушения, в то время как увеличение радиуса канала процесс разрушения ускоряет.

Не вызывает сомнений, что в Арктической зоне России, богатой углеводородными ресурсами, во



Рис. 6. Глубоководное озеро – возможный палеократер газового выброса на полуострове Ямал (Bing Microsoft)

многих районах существуют природные притоки газа в зону ММП и его выходы на поверхность Земли и в водную толщу озер, рек и акваторий Северного Ледовитого океана. ММП являются региональным флюидоупором, способным перенаправлять субвертикальные потоки газа в субгоризонтальном направлении, при этом создаются аномально высокие пластовые давления, которые способствуют разрыву сплошности

пород в наиболее слабых зонах, где развиты разломы и сквозные талики. Вероятно, что многие глубокие озера округлой формы на полуостровах Ямал и Гыданский имеют генезис кратеров газового выброса, заполненных водой (рис. 6). Нередко эти озера расположены рядом с крупными реками и озерами. На рис. 6 показан пример круглого озера диаметром около 26 м (объект № 18), расположенного южнее Бованенковского НГКМ на широте около 70° в 4 км южнее воронки В1 (космоснимок из системы Bing Microsoft) [4]. Вокруг этого озера на расстоянии до 50—70 м наблюдается нарушение кустарниковой растительности (светло-коричневый цвет), обусловленное выброшенной сульфидной породой.

Мы считаем крайне важным продолжение экспедиционных исследований выявленных воронок газовых выбросов, подобных



Рис. 7. Воронка на Ямале. Состояние 8 июля 2015 г. (фото из вертолета В. И. Богоявленского)

им по форме и местам образования глубоких озер — возможных палеократеров газовых выбросов и потенциально опасных объектов, в частности бугров пучения (булгуннях — *pingo*). Необходимость «проведения комплексных научных исследований по изучению опасных природных явлений» подчеркивается в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», утвержденной Президентом Российской Федерации 20 февраля 2013 г. (п. 14е и др.).

8 июля 2015 г. при поддержке губернатора ЯНАО Д. Н. Кобылкина состоялась очередная экспедиция, организованная заместителем губернатора А. В. Мажаровым, директором РЦОА В. А. Пушкаревым и заместителем директора ИПНГ РАН В. И. Богоявленским [6]. При анализе состояния воронки В1 сразу бросилось в глаза значительное повышение уровня воды, произошедшее в весенне-летнее время 2015 г. (рис. 7). На поверхности водоема В1 плавают остатки льда. Замеренная температура воды в воронке составила всего 2°C, в то время как в соседнем мелком (до 3 м) озере она достигла 9°C. Это обусловлено ледяным составом стенок кратера, что было доказано во время экспедиции РЦОА в ноябре 2014 г., когда в кратер газового выброса впервые в мире спустились специалисты и провели ряд важных исследований [4; 5].

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Мониторинг воронки газового выброса В1 показал, что такие объекты могут превращаться в обычные озера за очень короткий срок (до двух-трех лет), что осложняет их обнаружение и изучение.
- Комплексный анализ имеющихся данных свидетельствует, что выбросы газа из недр Земли с образованием наземных и подводных (в морях, озерах и реках) воронок — кратеров является далеко не новым явлением, а лишь недостаточно изученным.
- Своевременному выявлению крупных выбросов газа, сопровождающихся маломагнитудными землетрясениями, будет способствовать установка в Арктике сейсмических станций, передающих информацию в реальном времени в единую базу данных Геофизической службы РАН.
- В ИПНГ РАН создается геоинформационная система, включающая данные аэрокосмических и экспедиционных исследований, которая будет способствовать повышению безопасности освоения ресурсов нефти и газа Арктики.

Результаты математического моделирования процесса образования кратеров (воронок) газового выброса в арктических условиях докладывались на Всероссийской конференции «Арктика — нефть и газ 2015», прошедшей в Москве 21—23 апреля 2015 г. [5].

Литература

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 11—16.
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
3. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология, экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 48—59.
4. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—10.
5. Богоявленский В. И., Гарагаш И. А. Математическое моделирование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике // Сб. материалов Всероссийской конференции «Арктика — нефть и газ 2015». — С. 4. — (DVD).
6. Богоявленский В. И., Мажаров А. В., Пушкарев В. А., Богоявленский И. В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямала: Предварительные результаты экспедиции 8 июля 2015 г. // Бурение и нефть. — 2015. — № 7. — С. 8—13.
7. Гарагаш И. А. Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемерзлых и гидратосодержащих породах // Электрон. журн. «Георесурсы, геознергетика, геополитика». — 2012. — Вып. 2 (6).
8. Гарагаш И. А., Николаевский В. Н. Неассоциированные законы течения и локализация пластической деформации // Успехи механики. — 1989. — Т. 12, № 1. — С. 131—183.
9. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quart. of Applied Mathematics. — 1952. — Vol. 10, № 2. — P. 157—165.
10. Fish A. M., Zaretsky Y. K. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature: CRREL Report 97-6 / US Army Corps of Engineers. — [S. l.], 1997. — 14 p.
11. Garagash I. A. Calculation of surface subsidence associated with oil and gas production from multilayered deposits with abnormal pore pressure // Environmental and Safety Concerns in Underground Construction / Lee, Yang & Chung (eds.). — Balkema, 1997. — P. 205—208.
12. FLAC3D — Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 3.1, User's Manual / Itasca Consulting Group, Inc. — Minneapolis, 2006.