

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-21-1-117-130

ФИЗИКА

УДК 550.3

## **УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОРОНКИ И ДРУГИХ ИСТОЧНИКОВ ВЗРЫВНЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА**

**В. В. Кузнецов**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
684000, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vvkuz38@mail.ru

Предлагается модель образования взрывной воронки на Ямале и выброса метана на острове Беннетта. Причина подобных явлений состоит в воздействии ударной волны на объем залежей газогидратов в вечной мерзлоте. Газогидраты разрушаются при прохождении через них ударной волны землетрясения или ледотрясения (icequake), частых в зонах концентрации газогидратов. Для возникновения взрывной воронки или «вулкана» на острове Беннетта может понадобиться несколько следующих друг за другом землетрясений (ударных волн).

*Ключевые слова: выбросы метана, землетрясения, ударные волны.*

© Кузнецов В. В., 2018

## Введение

Во второй половине 2014 г. в СМИ появились сообщения об обнаружении странных воронок на Ямале и в других аналогичных областях многолетнемерзлых пород (ММП). Воронки представляют собой круглые отверстия в грунте диаметром несколько десятков метров. Глубина воронок чаще не известна, но, очевидно, что она больше их диаметров. Воронки располагаются в зоне вечной мерзлоты и залежей газовых гидратов. По краям воронок наблюдается выброшенный из них грунт, причем его количество значительно меньше, чем объем воронок.



Рис. 1. Воронка на Ямале [1]

Глядя на фотографию (рис. 1), можно заметить, что стенки воронки как бы оплавлены. По наблюдениям очевидцев, на дне воронок – вода. Многие считают, что через некоторое время воронка заполнится водой, и на её месте образуется озеро. Подобных озер в тундре много, много было и воронок, подобных нашей.

В СМИ обсуждаются четыре возможных причины образования воронок: падение метеорита, карстовая воронка, образование бугра пучения и выброс подземного газа. Не будем анализировать три первые причины, остановимся на четвертой – взрыв и выброс метана, накопившегося под землей в результате постепенного разрушения (плавления) метановых гидратов. Эта причина достаточно очевидна, очевидно также то, что вокруг воронок мало выброшенного грунта. Не совсем понятна и проблема, откуда берется энергия на образование этих воронок. Тем не менее, все авторы публикаций о воронках склоняются к тому, что это - «воронка взрыва» как «особый тип вулкана, в котором жерло создано сильным взрывом газов, пробивших канал до земной поверхности. Выброшенные продукты образуют кольцевой вал вокруг воронкообразного устья жерла, заполненного грубыми обломками породы ...».

Принципиальным моментом, касающимся образования воронок, как подчеркивается всеми, кто их посещал, - это отсутствие признаков высокотемпературного взрыва и

следов горения, которые могли бы произойти в метане, выделившемся при разрушении газогидратов. Это ограничение оставляет нам единственный способ образования воронки – физический взрыв, например, за счет быстрого ударного выделения метана плюс плавления и испарения льда и последующего перегрева паров воды. В дальнейшем будем учитывать эти обстоятельства.

Проблема выброса газов в атмосферу из подземных источников обсуждалась и раньше. В те годы речь шла о возникновении таинственных облаков над Восточно-Сибирским морем. Разгадка оказалась настолько же простой, насколько неожиданной. Облака, возникающие над островом Беннетта в этой части моря, много лет ставили в тупик ученых и . . . военных.

Когда впервые было замечено облако необычной протяженной формы, шла «холодная война». Поэтому в первую очередь подозрение пало на СССР. Американцы решили, что необычные облака, возникающие в определенные промежутки времени, появляются в результате испытаний нового секретного оружия. Уникальность этих облаков, получивших название «Bennett island cloud plume», состоит в том, что они не только появляются регулярно с момента первого их обнаружения на спутниковых снимках в 70-х годах, но и в их форме узких и длинных шлейфов дыма в районе острова Беннетта.

После исключения предположения о военном происхождении облаков ученые, изучающие снимки Восточно-Сибирского моря, стали склоняться к теории о выбросах метана. Метан в таких местах может находиться в форме гидрата – кристаллической структуры льда с включением метана. Нарушение такой структуры вызывает выброс со дна газообразного метана. Подобной теорией когда-то пытались объяснить и феномен Бермудского треугольника.

Обсуждая физику взрывных воронок, по-видимому, полезно одновременно рассматривать и физику похожих явлений, впервые обнаруженных на острове Беннетта. Для меня это был первый опыт общения с самопроизвольными выбросами газов. Можно допустить, что эти явления, различные по масштабу, близки по физике.

## Немного истории. Извержение на острове Беннетта в 1983

В середине 1983 г. академик А.А. Трофимук, директор института геологии и геофизики СО РАН, ознакомил меня с письмом от американских геологов. Американцы сообщали Андрею Алексеевичу, что «у вас в России, около острова Беннетта (острова Де Лонга в Восточно-Сибирском море), извергается вулкан!». К письму прилагалась фотография из космоса, на которой был запечатлен газовый шлейф, начинающийся от этого острова и тянувшийся в сторону Аляски- Канады. Андрей Алексеевич сказал мне, что это, конечно, не вулкан, а, скорее всего, выброс метана и предложил мне подумать над возможной причиной этого явления. Необходимо было найти основание для резкого, массового, коллективного и довольно длительного выброса метана, напоминающего извержение вулкана. Задача оказалась совсем не простой и очень интересной. Как мне представляется сегодня, решение её, в принципе, возможно, и оно может быть распространено и на другие подобные природные явления. Однако решение этой задачи не удастся найти в рамках классической физики. Приходится привлекать квантовую механику, а этот подход в наше время ещё не получил необходимого уровня развития.

Информация по извержению вулкана на о. Беннетта 1983 г. помещена в статье Масуренкова и др. [2], слабый газовый шлейф длиной 90 км был зафиксирован 18 февраля (04:04:27). Через два с лишним часа там хорошо прослеживался двойной или даже тройной источник газовых истечений (8535, NOAA-7). Еще спустя 6 ч в 16:15–16:17 событие достигло, по-видимому, максимума. На следующем витке спутника погоды NOAA-7 никаких признаков газового извержения около о. Беннетта уже не наблюдалось. Таким образом, извержение 18 февраля 1983 г. продолжалось менее суток.

Вскоре я узнал, что моему приятелю Ю.Д. Кузьмину, сотруднику института вулканологии в Петропавловске-Камчатском, было предложено принять участие в экспедиции к о. Беннетта, цель которой была выяснить, нет ли там свидетельств недавнего извержения вулкана. По словам Юрия Дмитриевича, экспедиция следов недавнего вулканизма не обнаружила. С тех пор мне в СМИ неоднократно попадалась информация о спонтанных взрывных выбросах метана. Эти факты я пытался объяснить некой причиной, заставляющей огромные количества метана, «вмороженного» в гидраты (клатраты воды), одновременно по некоторой, до сих пор не совсем ясной причине, освобождаться из ледяной структуры и вырываться в атмосферу. Однако такого количества упоминаний о подобных явлениях, как это произошло в 2014 году, раньше не было.

Заинтересовавшись физикой образования воронок и имея ввиду некоторые модели самоорганизации геофизической среды, которые я развивал в течение всех прошедших с тех пор лет, я решил вернуться к событию на о. Беннетта и обнаружил в Интернете работу [2], в которой авторы обсуждали мощные газовые шлейфы у о. Беннетта (архипелаг Де Лонга) в 1973–1986 гг. Экспедиция и последующие исследования установили места вероятных источников, представленных подводными конусами предположительно базальтовых излияний, появление которых датируется интервалом времени от 1974 по 1983 г. Ритмичность газовых извержений соответствовала изменению скорости вращения Земли и подобна ритмичности вулканических процессов, а мощность извержений адекватна средней мощности образования базальтовых конусов. Авторы этой работы полагали, что ими подтверждается ранее высказанная вулканическая гипотеза происхождения беннеттских газовых шлейфов.

В этой статье (а затем и в книге авторов) я обнаружил ту самую фотографию, которую мне показывал Андрей Алексеевич (рис. 2).

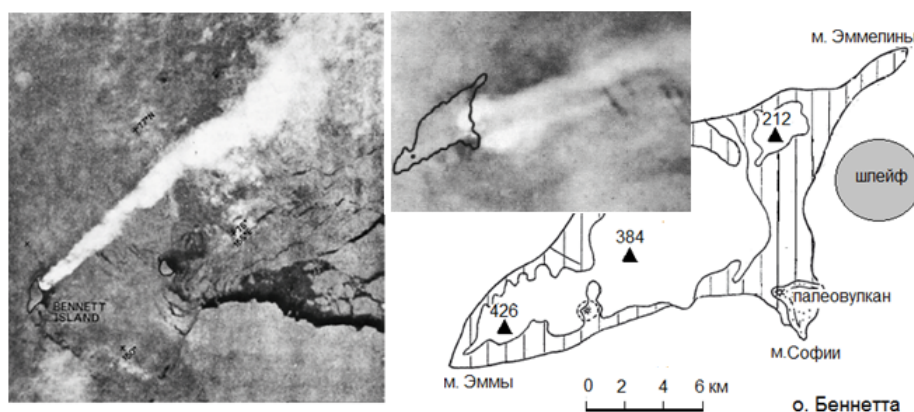


Рис. 2. Фото максимальной и начальной стадий образования газового шлейфа [3] (слева). Справа - план острова Беннетта [2]

Авторы статьи [2] придерживаются, как я отмечал, вулканической гипотезы образования беннеттских газовых шлейфов, хотя по ходу изложения неоднократно упоминают о реальности существования и другой, газогидратной гипотезы. Я написал об этом Ю.Д. Кузьмину, и он выслал мне книгу [4], изданную в ИФЗ в 2012 г, соавтором которой он является. Из книги следует, что в конце мая 1983 г. в Институте вулканологии и сейсмологии ДВНЦ АН СССР было получено письмо с космические снимками и статьей американского ученого Ю. Кинле [3]. Присланные материалы содержали сенсационную новость: 18 февраля 1983 г. был обнаружен гигантский газовый шлейф длиной до 300 км и шириной до 50 км протянувшийся от о. Беннетта почти до Аляски. По внешнему виду шлейф типично вулканический.

Выходит так, что американский геолог выслал фотографии шлейфа о. Беннетта не только А.А. Трофимуку, но и директору института вулканологии С.А. Федотову. И если Андрей Алексеевич сразу принял версию газогидратов, то Федотов и его сотрудники придерживались вулканической причины.

21 июля 1983 г. в Институте вулканологии была создана экспедиция в составе: Ю.П. Масуренков – начальник экспедиции, С.А. Федотов – научный руководитель, Ю.Д. Кузьмин – начальник отряда. В составе экспедиции - сотрудники института вулканологии. В последующие годы эти исследования продолжил коллектив института физики Земли. Идея вулканической природы шлейфа сохранялась.

Тем не менее, авторы статьи упоминают американские работы и вполне допускают, что причиной шлейфа могли быть газогидраты. Сомнение у авторов вызывает такой вопрос, откуда может взяться энергия на создание такого мощного шлейфа, который, по оценке авторов, может достигать не менее  $6 \times 10^8$  кВт и общей энергией не менее  $1.3 \times 10^{16}$  Дж при 6-часовом действии. Если же учесть, что некоторые подобные события продолжаются здесь в течение нескольких ( $n$ ) суток, то выделяющаяся при этом энергия должна составлять не менее  $n \times 10^{17}$  Дж, что соответствует среднему вулканическому извержению, при котором изливается обычно 0.05-0.30 км<sup>3</sup> базальтов.

В заключение книги авторы приходят к выводу: «По-видимому, участия метана в беннеттских извержениях отрицать нельзя. Ведь мощный тепловой поток, создаваемый вулканическим процессом, неизбежно должен расплавить газогидраты (а они, похоже, повсеместно присутствуют под дном сибирских морей) и вовлечь в извержение выделившийся из них метан».

## Модель образования воронки

Рассмотрим модель, в которой воронка образуется за счет спонтанного выброса метана при разрушении (взрыве) газогидратов при воздействии на них ударной волны, являющейся причиной землетрясения. При этом происходит быстрое выделение метана из газогидратов, и создается давление достаточное для выброса части грунта («пробки») посредством формирования как самого взрыва, так и объема (канала) воронки. При решении этой задачи следует выяснить, например, почему так мало выбрасывается грунта при взрыве, почему воронка имеет форму трубы (направленный взрыв?), в каком виде используется энергия газогидратов, и насколько её хватит при выбросе вещества воронки и т.п. Наша модель базируется на особой роли в этом явлении ударной волны (УВ). Как известно, фронт УВ переносит в твердом упругом теле огромное количество энергии практически без потерь. Именно эта идея заложена в ударно-волновой модели землетрясения, разрабатываемой автором

[5]. Модель позволяет найти объяснения практически всем особенностям явлений, происходящих в грунте при выходе УВ на его «свободную» поверхность. Самым сложным, но решаемым моментом в нашей модели землетрясения - это обоснование физики возникновения УВ на огромном пространстве, достигающем тысячи км. Как кажется, эта задача, тем не менее, имеет решение, правда не простое.

Надо сказать, что идея использования землетрясений при объяснении физики разрушения газогидратов ранее предлагалась рядом авторов [1, 6]. Мы поступим точно так же, для чего учтем, что величина энергии землетрясений различной магнитуды однозначно связана с его геометрическим размером (длиной разлома). Отметим при этом, что залежи газогидратов на поверхности Земли представляют собой не сплошной массив, а довольно редкие вкрапления [6]. В то время как эпицентры землетрясений (особенно, включая очень слабые) в интересующем нас регионе встречаются заметно чаще, чем залежи газогидратов [1]. Можно сделать вывод, что практически в любое скопление газогидратов раньше или позже «попадет» землетрясение. Это принципиальный момент нашей модели.

Итак, в основу нашей модели воронки положено ударное (взрывное) воздействие на газогидраты УВ, возникающей в литосфере и распространяющейся в направлении к дневной поверхности. УВ возникает за счет быстрого фазового структурного перехода в среде. Она распространяется по упругой среде практически без потерь и выходит на поверхность, где при этом возникает волна разгрузки (разрежения), которая движется в обратном направлении. Взаимодействие двух волн: ударной и разгрузки, приводит к сильным движениям (колебаниям) грунта, т.е. разрушению строений, возникновению разрывов грунта, его подъему или опусканию и пр.

Если на пути УВ встречается неупругая среда (например, трещиноватая, пористая или жидкая), то УВ рассеивается на такой «преграде» и диссипирует, что приводит к поглощению УВ и нагреву среды. УВ в нашей задаче можно (условно) рассматривать как некий взрыв.

Заметим, что в технологии производства газогидратов УВ используется не для их разрушения, а совсем наоборот - синтеза. Например, в работе [7] предлагается технология по получению гидрата метана методом воздействия высокоамплитудных импульсов давления (ударных волн) на насыщенную пузырьками метана воду. Достоинствами данного метода, по сравнению с известными аналогами, является существенная интенсификация процесса образования гидратов газов.

Собственно, под взрывом будем понимать резкое увеличение (в течение очень короткого периода фронта УВ) свободного метана во внутренней полости грунта, приводящее к прорыву «крышки» с выбросом её содержимого и освобождением сжатого газа и воды. Формально подход к решению этой задачи «направленного взрыва» можно найти, воспользовавшись несколькими «правилами», обоснованными в книге [8]. Суть их состоит в следующем.

Пусть заряд взрывчатых веществ (ВВ) с энергией находится на глубине  $h$  от поверхности Земли. Требуется определить начальное поле скоростей, возникающих в грунте после подрыва такого заряда. Действие взрыва заменяется источником интенсивности, которую авторы определяют из энергетических соображений. Многочисленные эксперименты показывают, что примерно  $1/10$  всей энергии заряда расходуется на массовое движение грунта, а остальная энергия идет на образование УВ. Далее авторы получают зависимости между  $A, E$ , размерами заряда ВВ  $r$  и глубины закладки заряда  $h$ , что позволяет оценить скорости перемещения грунта по его поверхности  $V(r)$ .

Смысл направленного взрыва, а воронка в этом смысле является именно таким примером, состоит в том, чтобы разделить взрыв на несколько разнесенных во времени и в пространстве источников. Скажем ещё об одном «правиле», следующем из этой книги и выявленном по опыту специалистов, - это так называемый «закон подобия». Например, для того, чтобы получить воронку объемом  $V$  требуется сосредоточенный заряд ВВ весом  $Q$ . Какой заряд потребуется, если в той же породе нужно получить воронку объемом  $kV$ ? Много лет тому назад было определено, что заряд ВВ должен быть  $kQ$ . Практически принято считать, что для грунта (в широком диапазоне значений его параметров) на один кубический метр грунта потребуется один килограмм взрывчатки (тротила).

Энергетические оценки «эффективности» воронки проведем в «тротиловом эквиваленте», учитывая, что один грамм TNT (тротила) эквивалентен 4 кДж, 1 кг TNT (4000 кДж) соответствует одному  $\text{м}^3$  грунта, весом примерно 2000 кг. Сопоставим эти цифры. Учтем, что грунт, это практически лед, теплота плавления льда 330 кДж/кг, а теплота испарения  $U \approx 2000$  кДж/кг. Таким образом, соотношение Лаврентьева ( $1 \text{ м}^3$  грунта = 1 кг TNT) с учетом принципа полного испарения Зельдовича (2 теплоты испарения) в нашем случае выполняется ( $1 \text{ м}^3$  грунта =  $2U$ , где  $U$  – теплота испарения). Наши оценки совпадают с оценкой предела прочности, следующей из кинетической теории прочности.

## Параметры воронки

Приведем размеры воронки на Ямале [1]. По внешнему краю диаметр воронки составляет около 37 м, по внутреннему – не больше 25 м, а глубина от края бруствера до уровня воды - 35 м и около 40 – 42 м до дна. Объем внутреннего пространства воронки составляет  $\approx 18 - 19$  тыс.  $\text{м}^3$ , что многократно превышает объем выброшенной породы, точно учесть который невозможно из-за потери значительной части при таянии ледогрунта. Судя по всему, до взрыва выброшенная порода (бруствер воронки) являлась крышкой пустотного пространства, толщина которой, видимо, достигала 7-9 м.

Оценим величину энергии, необходимой для создания воронки такого размера. Примем для ориентировочной оценки, что объем воронки 20 тыс.  $\text{м}^3$  ( $2 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ ). Положим, что необходимо испарить именно такой объем льда воронки. Масса льда воронки, полагая массу льда  $1 \text{ м}^3 \approx 103$  кг, равна примерно  $2 \cdot 10^7$  кг. Теплоту испарения льда примем:  $U \approx 2000$  кДж/кг. Общая затрата энергии для образования нашей воронки оказывается порядка  $\approx 5 \cdot 10^{13}$  Дж. Энергия такой величины переносится землетрясением с магнитудой  $M \geq 6$ . Это очень большое землетрясение с размером очага в десятки километров, и оно не может произойти не замеченным. «Потерять» землетрясению магнитудой  $M = 6$  всю его огромную энергию в воронке размером в несколько десятков метров невозможно. От этой идеи следует отказаться.

Рассмотрим другие, более энергетически выгодные пути использования энергии землетрясения для формирования воронки. В этом случае представим себе череду повторяющихся значительно более мелких землетрясений с размером очага в несколько десятков метров и магнитудой  $M = 3$ . Энергия такого землетрясения  $E \approx 10^8$  Дж. Положим, что вся энергия такого землетрясения поглотилась в объеме нашей воронки. Учтем некоторые, выявленные сравнительно недавно особенности воздействия УВ на среду. Авторы работы [9] крупномасштабным молекулярным моделированием

динамики распространения ударной взрывной волны и квази-изоэнтропического (адиабатического) сжатия дефектных кристаллов показали, что в случае распространения УВ по пластической среде в ней возможно т.н. виртуальное плавление. Суть эффекта сводится к тому, что на фронте УВ уменьшается температура плавления вещества на 80 %, что составляет, например, для меди  $\Delta T \approx 4000$ . В результате взаимодействия УВ с пластической средой получается некий продукт, получивший название переохлажденной жидкости. Этот продукт релаксирует и повторно кристаллизуется за время порядка пикосекунды. Однако вполне может оказаться, что на фронте УВ газогидраты могут мгновенно разрушиться, метан - освободиться, а лед - растопиться (испариться).

Если при прохождении УВ через газогидрат температура на фронте может виртуально повыситься на 40 градусов (до 33°, рис. 3), то давление метана в системе может достигнуть 100 000 кПа. Что такое 100 тыс. кПа? Это 100 МПа, что равно 1000 атм или 1 кбар. Такого давления вполне достаточно, чтобы сформировать воронку заданных размеров, т.е. «вышибить» пробку и находящиеся в воронке воду и лед. Для примера, давление в стволе артиллерийской пушки в момент выстрела составляет 630 бар.

Заметим, что процесс ударно-волнового выброса метана может происходить очень быстро в отличие от разрушения газогидратов при их нагреве за счет теплопроводности [10]. Процесс испарения льда (ледогрунта) реализуется путем формирования волны испарения, которая является следствием диссипации УВ, и волны разгрузки при прохождении УВ в неупругой среде аналогично тому, как это происходит в явлениях высокой плотности энергии, таких как образование кумулятивных струй, сварка взрывом, пробивание и пр. [11]. Скорость волны испарения близка к скорости звука в двухфазной среде. Модель предполагает возможность повторения ударов в воронку в том случае, если она осталась незавершенной после первого удара.

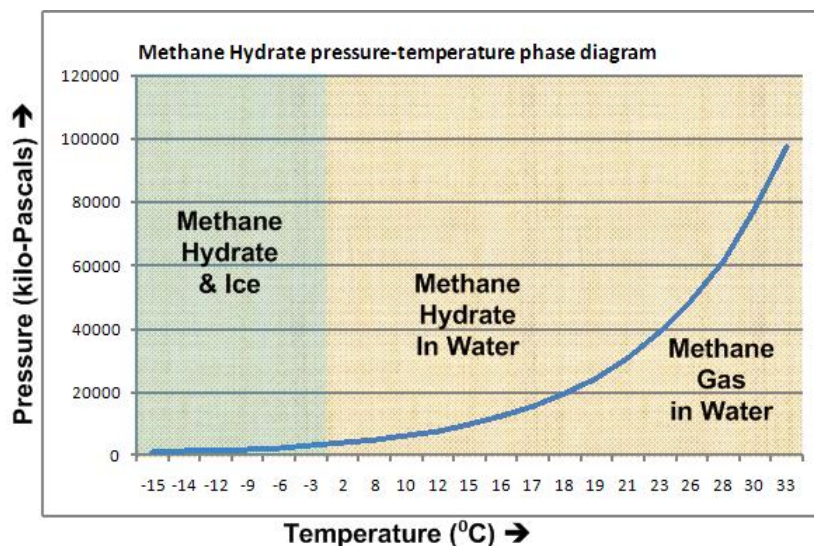


Рис. 3. Фазовая диаграмма газогидрата [http://en.wikipedia.org/wiki/Methane\\_clathrate](http://en.wikipedia.org/wiki/Methane_clathrate)

На рис. 3 показано, что необходимо нагреть газогидраты (т.е., собственно, лёд) примерно на 40 градусов. На этом графике не учитывается некоторое особое свойство льда. Лёд, как и ряд других веществ, например, кремний, плавятся с аномальным изменением объема (рис. 4-А).

Из рис. 4-В-в следует, что у таких веществ, чем выше давление, тем ниже температура плавления вещества. В нашем случае идет речь о давлении на фронте



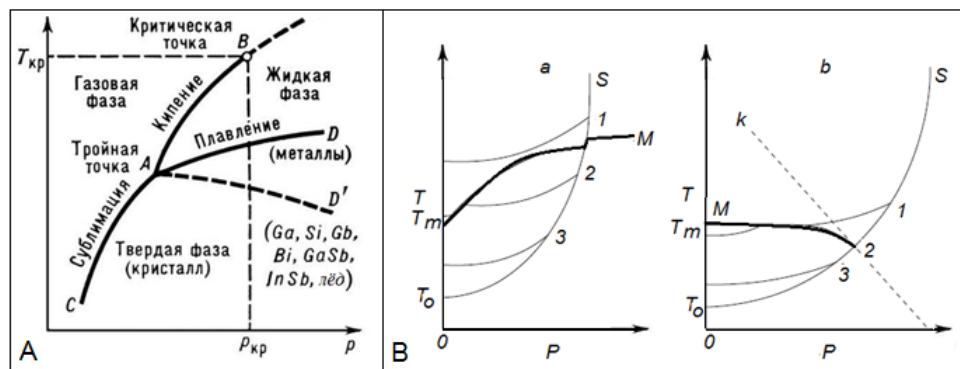


Рис. 4. А - Диаграмма состояния чистого вещества ( $P$  – давление,  $T$  - температура). Линии  $AD$  и  $AD'$  – кривые плавления, по линии  $AD'$  плавятся вещества с аномальным изменением объема при плавлении. Точка  $A$  – тройная точка;  $B$  – критическая точка. В - Схемы ударно-волнового плавления некоторых веществ: а – ударная адиабата ( $S$ ) и кривая плавления ( $M$ ) металла (без аномалий), б - ударная адиабата ( $S$ ), кривая плавления ( $M$ ) и касательная к кривой плавления ( $k$ ) металла с аномальными характеристиками [12]

УВ. Иначе, чем сильнее УВ (чем короче её фронт при той же энергии в УВ), тем ниже температура плавления. Тем проще достигается эффект виртуального плавления и испарения среды.

Мы не знаем условий, при которых плавится и испаряется ледогрунт при воздействии на него УВ. Таких данных найти не удалось. Если мы приняли слишком большую величину  $\Delta T \approx 40^\circ$ , то от первого удара УВ воронки может не получиться. В подтверждение сказанному можно сослаться на рисунок такой «недоделанной» воронки, приведенный в статье (Богоявленский, 2014). Точно также, мы не располагаем точными сведениями о том, расплавится ли лед газогидрата в момент прохождения УВ или испарится. Все эти варианты в принципе возможны, но для полного понимания сути явления необходимо либо расчетом, либо (что лучше) экспериментом уточнить предлагаемую нами схему.

Сравним нашу оценку энергии образования воронки с энергией шлейфа о. Беннетта, которая может достигать не менее  $6 \times 10^8$  кВт с общей энергией не менее  $1.3 \times 10^{16}$  Дж при 6-часовом действии. Мы приняли объем воронки  $\approx 20 \times 10^3 \text{ м}^3$ , т.е. её характерный линейный размер (диаметр)  $\approx 25$  м. Полагая, что и в воронке, и в источнике на о. Беннетта явления идентичны и отличаются друг от друга по объему (энергии) в  $k$ -раз, то тогда величина  $k \approx 13 \times 10^{15} / 3.6 \times 10^8 = 4 \times 10^7$ . При этом линейные размеры обоих источников различаются как корни третьей степени, иначе, в 300 раз, т.е. характерный размер источника (например, диаметр) шлейфа с о. Беннетта может составлять примерно 5 км. Это похоже на правду настолько, насколько можно оценить размер шлейфа по рисунку 2, учитывая, что габариты о. Беннетта примерно  $10 \times 20$  км.

Скажем несколько слов о природе газового шлейфа на о. Беннета и возможности его проявления при образовании воронки. Судя по рис. 2, шлейф - это, скорее всего, хорошо известный след, возникающий в атмосфере после пролета самолетов и высотных ракет. Он представляет собой конденсат паров воды. Много лет тому назад перед лабораторией, которой я в то время руководил, была поставлена задача найти способ сделать такой шлейф невидимым. Насколько мне известно, аналогичная

задача была поставлена перед многими физиками как в России, так и за рубежом. Ни нам, ни нашим коллегам решить её не удалось, но разобраться в физике мы сумели. По разным оценкам, длительность шлейфа на о. Беннетта  $T$  составляла примерно от 6 до 12 часов. Воспользуемся величиной  $k$  и оценим длительность шлейфа из воронки  $t = T/k \approx 5$  секунд. Зафиксировать такой след из космоса может и удастся, но только при непрерывном мониторинге региона. В таком случае желательно, чтобы данные оптического и сейсмического мониторингов сравнивались.

Идея передачи энергии, например, из глубоких слоев Земли на её поверхность с помощью УВ мне представляется очень продуктивной в геофизике, в частности, в физике землетрясений и вулканических извержений. Похоже, что эта идея может оказаться ключевой и в формировании воронки. Пока ее разработка находится только на уровне гипотезы, но очевидно, что при дальнейшем развитии модели образования мощных кооперативных, самосогласованных разрушений газогидратов, таких как на Ямале или на о. Беннетта, эту идею следует проработать более детально. Пока же обратимся к некоему аналогу воронки (конечно, не в буквальном смысле) - образованию отверстия при пробивании металлической преграды кумулятивной струей. Аналогия может быть связана с тем, что в обоих случаях мы имеем дело с быстрым испарением среды.

Модель образования воронки может выглядеть примерно так. Взрывное, вызванное УВ землетрясения, накопление газов приводит к выбросу грунта. При этом УВ, распространяясь по газогидрату, вызывает его испарение, которое происходит со скоростью, меньшей скорости звука. Длина и радиус воронки определяются реологией среды, с одной стороны, и энергией УВ, с другой. При этом такая воронка должна выбрасывать метан и пары воды, что должно бы привести к образованию шлейфа, конечно, значительно меньшего, чем произошедшего на о. Беннетта.

Пару слов о том, вулканический ли процесс разрушения газогидратов о. Беннетта? Ранее мы обсуждали этот вопрос и склонялись к тому, что на Беннетта извержение вулкана в его привычном виде сомнительно. Сейчас, после вынесения заключения о схожести процессов образования газовых выбросов в воронке и на о. Беннетта, можно сделать вывод о том, что выброс на острове вполне можно считать вулканическим, если допустить, что «магматический очаг» представляет собой перегретый пар воды и метан. Мы ведь называем выбросы грязи грязевыми вулканами. По-видимому, похожая ситуация наблюдается и в рассматриваемом нами случае. Общим элементом в наших моделях является присутствие УВ. Это принципиально новый и очень важный момент, позволяющий рассматривать многие явления природы с общей позиции.

## Заключение

Готовя эту записку, я ещё раз убедился в справедливости мысли Исаака Ньютона: «Природа проста и не роскошествует излишними причинами». Я уже упоминал, что природа сочинила прекрасный способ транспортировки энергии посредством формирования и распространения УВ. Как иначе можно транспортировать энергию с глубины 700 км? За счет теплопередачи? Это очень медленно и не результативно. Конвекция быстрее, но не во всякой среде осуществима.

По тексту записки я ссылался на книгу Лаврентьева, в которой утверждалось, что 90% энергии взрыва преобразуется в УВ, которая чаще всего инженерами не

используется, а зря. Теперь о воронках. Трудно представить, что у каждой из известных в природе воронок свой механизм образования. Что я имею в виду? Во-первых, это воронки, о которых ведется речь здесь, далее, это воронки т.н. Сасовского взрыва, дыра в Бованенково, Суловская воронка в районе падения Тунгусского метеорита. Сюда можно отнести такие «воронки» как алмазные трубки, т.н. диатремы. Можно отнести и явление, называемое реологическим взрывом [13], реализуемым в экспериментах в виде эффекта Бриджмена и т.д. Общим свойством всех перечисленных выше явлений является то, что механизм их образования не ясен. Наиболее изучен эффект Бриджмена. Достоинство его состоит в том, что его легко реализовать в эксперименте. Явление, называемое «реологический взрыв», возникновение некоторых из воронок (Сасовский взрыв и др.) объясняют именно тем, что они «построены» на этом эффекте. Но четкой причины явления, лежащего в основе эффекта Бриджмена, тоже нет.

И в то же время существует такое явление как ударная волна. Физики хорошо знают, как она распространяется, к чему приводит выход УВ на свободную поверхность и т.п. [14]. Известно, что структурный фазовый переход может быть причиной возникновения УВ. Но и здесь все не так прозрачно, как хотелось бы. Простой пример. Предположим, что землетрясение на Суматре – это результат «срабатывания» сформировавшейся УВ. Линейный размер такой УВ достигает 1000 км. Синхронность события составляет доли секунды. Возникает вопрос, каким образом можно синхронизировать геологическую среду, чтобы обеспечить такой синхронизм. Такая проблема в классической физике решения не имеет. Физика раньше отвечала на такой вопрос следующим образом: «среда обладает кооперативными свойствами». И всё. Но этого, конечно, мало. Ответ на подобный вопрос имеется в квантовой механике. Он базируется на известном ЭПР (Эйнштейна-Подольского-Розена) парадоксе. В последние годы физики переформулировали подобные вопросы следующим образом: как перейти из квантовой микрофизики в классическую макрофизику. В некоторых областях науки (квантовая химия, квантовая биология и пр.) уже находятся подходы к решению близких по смыслу задач.

Для решения задач, подобных нашей, необходимо развитие принципиально новой науки - квантовой геофизики ([www.vvkuz.ru](http://www.vvkuz.ru)).

## References

- [1] Богоявленский В. И., “Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра”, *Бурение и нефть*, 2014, №9, 13-18. [Bogojavlenskij V. I., “Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Jamala i Tajmyra”, *Burenie i neft'*, 2014, №9, 13-18].
- [2] Масуренков Ю. П., Слёзин Ю. Б., Собисевич А. Л., “Газовые шлейфы у острова Беннетта”, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2015, №3, 86-95. [Masurenkov Ju. P., Sljozin Ju. B., Sobisevich A. L., “Gazovye shlejfy u ostrova Bennetta”, *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*, 2015, №3, 86-95].
- [3] Kienle J. A., Roederer I.G., Shaw G. E., “Possible methane plumes in the Far Arctic-an hypothesis”, *EOS. Trans. Amer. Geophys. Union*, **64**:20. (1983), 377.
- [4] Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В., Слёзин Ю.Б., Флёров Г.Б., Шувалов Р.А., Кузьмин Ю.Д., Овсянников А. А., *Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика)*, ИФЗ РАН, М., 2012. [Masurenkov Ju.P., Sobisevich A.L., Petrova V.V., Sljozin Ju.B., Fljorov G.B., Shuvalov R.A., Kuz'min Ju.D., Ovsjannikov A. A., *Sovremennaja aktivnost' jendogennyh processov u ostrova Bennetta (arhipelag De Longa, Arktika)*, IFZ RAN, M., 2012].

- [5] Кузнецов В.В., “Ударно-волновая модель землетрясения. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность”, *Физическая мезомеханика*, **12:6** (2009), 87-96. [Kuznetsov V.V., “Udarno-volnovaja model’ zemletrjasenija. Sil’nye dvizhenija zemletrjasenija kak vyhod udarnoj volny na poverhnost’”, *Fizicheskaja mezomehanika*, **12:6** (2009), 87-96].
- [6] *Methane Release caused by Earthquakes*, Arctic News. September 15, 2013. (Arctic News, 2013)..
- [7] Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В., “Получение газогидратов при помощи ударно-волнового метода”, *Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии*, **2(13)** (2013). [Nakorjakov V.E., Coj A.N., Mezencev I.V., Meleshkin A.V., “Poluchenie gazogidratov pri pomoshhi udarno-volnovogo metoda”, *Sovremennaja nauka. Issledovanija, idei, rezul’taty, tehnologii*, **2(13)** (2013)].
- [8] Лаврентьев М. А., Шабат Б. В., *Проблемы гидродинамики и их математические модели*, Наука, М., 1973. [Lavrent’ev M. A., Shabat B. V., *Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli*, Nauka, M., 1973].
- [9] Levitas V.I., Ravelo R., “Virtual melting as a new mechanism of stress relaxation under high strain rate loading”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109:33** (2012), 13204-13207.
- [10] Якуцени В.П., “Газогидраты - нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы”, *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, **8:4** (2013), 1-24. [Jakuceni V.P., “Gazogidraty - netradicionnoe gazovoe syr’e, ih obrazovanie, svojstva, rasprostranenie i geologicheskie resursy”, *Neftgazovaja geologija. Teorija i praktika*, **8:4** (2013), 1-24].
- [11] Кузнецов В. В., *Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности (на примере соударения металлов)*, ИГиГ. СО АН СССР, Новосибирск, 1985. [Kuznecov V. V., *Jeffekty fazovyh perehodov pri vozdeystvii na veshhestvo jenerгии vysokoj plotnosti (na primere soudarenija metallov)*, IGiG. SO AN SSSR, Novosibirsk, 1985].
- [12] Дреннов О.Б., “Динамическое нагружение твердых тел, характеризующихся отрицательным наклоном кривой плавления”, *ЖТФ*, **83:9** (2013), 43-46. [Drennov O. B., “Dinamicheskoe nagruzhenie tverdyh tel, harakterizujushhihsja otricatel’nym naklonom krivoj plavlenija”, *ZhTF*, **83:9** (2013), 43-46].
- [13] Ярославский М. А., *Реологический взрыв*, Наука, М., 1982, 193 с. [Jaroslavskij M. A., *Reologicheskij vzryv*, Nauka, M., 1982, 193 pp.]
- [14] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Наука, М., 1966. [Zel’dovich Ja. B., Rajzer Ju. P., *Fizika udarnyh voln i vysokotemperaturnyh gidrodinamicheskikh javlenij*, Nauka, M., 1966].

## References (GOST)

- [1] Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. 2014. №9. № 10.
- [2] Масуренков Ю. П., Слёзин Ю. Б., Собисевич А. Л. Газовые шлейфы у острова Беннетта // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. №. 3. С. 86-95.
- [3] Kienle J.A., Roederer I.G., Shaw G.E. Possible methane plumes in the Far Arctic-an hypothesis // EOS. Trans. Amer. Geophys. Union. 1983. vol. 64, no. 20. pp. 377.
- [4] Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В., Слёзин Ю.Б., Флёров Г.Б., Шувалов Р.А., Кузьмин Ю.Д., Овсянников А. А. Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика). М.: ИФЗ РАН. 2012.
- [5] Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 6. С. 87-96.
- [6] *Methane Release caused by Earthquakes* // Arctic News. September 15, 2013. (Arctic News, 2013).

- [7] Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В. Получение газогидратов при помощи ударно-волнового метода // Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии. № 2 (13) 2013.
- [8] Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1973.
- [9] Levitas V.I., Ravelo R. Virtual melting as a new mechanism of stress relaxation under high strain rate loading // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012. vol. 109, no. 33 P. 13204-13207.
- [10] Якуцени В.П. Газогидраты - нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. - Т.8. - № 4.
- [11] Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности (на примере соударения металлов). ИГиГ. СО АН СССР. Новосибирск: 1985.
- [12] Дреннов О.Б. Динамическое нагружение твердых тел, характеризующихся отрицательным наклоном кривой плавления // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 43-46.
- [13] Ярославский М. А., Реологический взрыв. М.: Наука, 1982. 193 с.
- [14] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений М.: Наука, 1966.

**Для цитирования:** Кузнецов В. В. Ударно-волновая модель образования взрывной воронки и других источников взрывных выбросов метана // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2018. № 1(21). С. 117-130. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-21-1-117-130

**For citation:** Kuznetsov V. V. Shock wave model of the crater formation and other causes of explosive methane release, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2018, **21**: 1, 117-130. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-21-1-117-130

Поступила в редакцию / Original article submitted: 17.11.2017

В окончательном варианте / Revision submitted: 03.04.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-21-1-117-130

PHYSICS

MSC 86A17

## **SHOCK WAVE MODEL OF THE CRATER FORMATION AND OTHER CAUSES OF EXPLOSIVE METHANE RELEASE**

**V. V. Kuznetsov**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684000,  
Kamchatskiy kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

E-mail: vvkuz38@mail.ru

Model to explain the crater formation at the Yamal Peninsula and methane release on the Bennett Island is proposed. The reason causing these phenomena consists in the shock wave impact on permafrost gas hydrates deposits. Gas hydrates break up as the shock wave of an earthquake or an icequake common in their deposits area passes through them. Origin of crater or volcano formation on the Bennett Island appears to need a series of earthquakes (shock waves).

*Key words: gas hydrates, methane release, earthquake, shock waves.*

© V. V. Kuznetsov, 2018