

УДК 550.34, 550.36

ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫЕ ТЕЛА В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.М. Нечаев^a

Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: logata@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены результаты теоретических исследований механизмов землетрясений и вулканических извержений. Особая роль в этих механизмах отводится глубинным флюидонасыщенным зонам, физические параметры которых (давление, объем) определяют условия начала тех или иных катастрофических событий внутри земной коры.

Ключевые слова: вулкан, земная кора, флюид, механизм землетрясения, механизм вулканического извержения, флюидонасыщенные зоны

О глубинном строении земной коры мало что известно. В основном, о нем судят по данным сейсмозондирования, интерпретация которых не всегда удовлетворительна. В любом случае, литосфера не имеет сплошной структуры – в ней присутствуют многочисленные зоны, заполненные так называемыми флюидами, то есть жидкими или газообразными субстанциями, находящимися в толще земли при соответствующих давлениях и температуре. К флюидам, таким образом, можно отнести самые различные природные вещества, в том числе магму, воду в виде жидкости или пара, а также горючие газы водород и метан. Летучие флюиды – это те, которые находятся в газообразном состоянии или могут перейти в него при снижении давления. Об этом «нестандартном» строении земной коры свидетельствуют, например, результаты бурения на знаменитой «Кольской сверхглубокой» [1]. В ней на глубинах до 5 км были выявлены четко выраженные трещинные зоны мощностью от 30 до 80 см, которые повторялись каждые 500-1500 м. Породы вне этих зон были практически непроницаемыми. Ниже 9 км наблюдались интенсивные зоны мощностью 10-20 м высокой прони-

^a ORCID ID: 0000-0001-8833-4096

цаемости. Можно предположить, что сходная картина существует и на больших глубинах, где флюиды и, в частности, вода уже находятся в закритическом состоянии.

Если в трещинную зону поступает магма, поднимаясь из глубин мантии, то в ней может сформироваться магматический очаг – замкнутое скопление магмы, достигающее порой объема в несколько кубических километров. Там, где присутствует водяной пар или другие газы, может образоваться так называемое субгоризонтальное флюидонасыщенное тело (СГФТ), представление о котором развито в [2], и которое определим для себя как некий замкнутый объем V , содержащий газообразный флюид. Вертикальный размер СГФТ (средняя толщина h) намного меньше ее поперечных размеров: $h \ll (S)^{1/2}; V \sim hS$, где S – сечение СГФТ.

Существенно, что породы, заполняющие СГФТ, должны быть проницаемыми (пористыми) для того, чтобы давление флюида устанавливалось одинаковым по объему. Мы предполагаем, что ведущую роль в развитии таких катастрофических явлений, как землетрясения и вулканические извержения, играют подобные СГФТ, которые могут быть «замкнуты» между собой посредством тектонических трещин [3,4].

1 О механизме землетрясения

Землетрясение – одно из самых грозных и загадочных явлений природы. Его разрушительные последствия очевидны для всех, т.к. «лежат на поверхности», но «корни» страшных событий спрятаны глубоко под землей. Землетрясение является неотъемлемой частью рифтогенеза как геотектонического процесса. Можно сказать, что они генетически связаны друг с другом. Но физический механизм землетрясения, также как и его движущие силы, пока не установлены. Традиционные представления целиком основаны на механистическом подходе и теории упругости: тектонические напряжения, достигающие предела прочности пород, приводят к образованию разломов, трещин, подвижек и т.д. [5,6]. Однако этот механизм не способен дать ясную физическую интерпретацию всему разнообразию фактов и закономерностей, присущих землетрясениям и их неизменным атрибутам, таким как форшоки и афтершоки.

Традиционным является также представление о том, что флюиды в сейсмических зонах, играя роль своеобразной «смазки» внутри разломов и трещин, могут снижать силу взаимного трения блоков и пороговое значение напряжений, приводящих к подвижкам и землетрясению.

Возможность нестандартного влияния глубинных флюидов на возникновение и развитие землетрясения рассматривалась в ряде работ [6,7]. Описан механизм вертикального подъема флюидной области в верхние слои коры, в зону низких давлений [7]. Избыточное давление флюида, таким образом, способно испаривать трещины, продвигаясь по ним вверх, вплоть до поверхности земли. Авторы [6,7] приводят многочисленные свидетельства эмиссии различных газов перед и во время землетрясений, что в ряде случаев оказывалось более достоверным

предвестником главного удара, чем трудно фиксируемое усиление напряженного состояния коры.

Как известно, состояние флюида, находящегося в закритическом состоянии, удовлетворяет с хорошей точностью уравнению идеального газа [8]. Следовательно, давление флюида можно оценивать по формуле:

$$p = \frac{M_f(t)}{V} RT \quad (1)$$

где $M_f(t)$ – масса флюида, которая может меняться со временем, R – универсальная газовая постоянная флюида, T – температура.

СГФТ размещается на глубине H , предположительно, там, где присутствует непроницаемый для флюида слой, создающий ряд ловушек или покрышек. Образование подобных СГФТ может происходить в соответствии с механизмом подъема субвертикальных флюидных областей, описанном в [7]. Избыточное давление флюида расширяет и удлиняет микротрещину, а разность литостатических давлений между верхом флюидной области и ее низом продвигает всю флюидную область вверх (в сущности, она «всплывает» как некий снаряд), до тех пор, пока не достигнет преграды – непроницаемого слоя на глубине H .

В принципе, давление внутри стабильной СГФТ должно стремиться к литостатическому ρgH , где ρ – средняя плотность коры. Избыточное или недостаточное давление флюида может компенсироваться изменением объема СГФТ за счет микроразрушений. Таким образом, в соответствии с [7] мы предполагаем, что формирование СГФТ происходит за счет аккумуляции флюида при его подъеме из областей верхней мантии или при химических преобразованиях породы (например, дегидратации).

Для СГФТ должна существовать еще одна механическая характеристика: предел прочности P_{str} (предельное вертикальное давление на кровлю), при котором происходит разрушение («схлопывание») СГФТ. Если $P_{str} > \rho gH$, то разрушения СГФТ не происходит, даже если в ней вакуум. Если $P_{str} < \rho gH$, то СГФТ сохраняет целостность за счет давления флюида p , пока $\rho gH - p < P_{str}$ или $p > \rho gH - P_{str}$. При давлении флюида меньшем, чем $(\rho gH - P_{str})$, происходит обрушение кровли СГФТ и возможный сброс вышележащего блока на глубину h , если это позволяет существующая в данный момент система трещин. В сущности, это и есть сейсмический удар.

Максимально возможная энергия этого удара будет, очевидно, равна (при свободном падении блока) величине mgh , представляющей собой потенциальную энергию блока массой m , находящегося над СГФТ. Эта энергия (за вычетом работы на трение) преобразуется сначала в кинетическую энергию, затем в энергию удара при торможении и далее в энергию сейсмических волн.

Каким образом может быть осуществлен сброс давления в СГФТ? Это произойдет, если некая трещина, совокупность трещин или разлом соединит эту СГФТ с поверхностью земли или с другой СГФТ, находящейся на существенно меньшей глубине и при соответственно меньшем давлении. Подобное «корот-

кое замыкание» может иметь место в зонах тектонического напряжения – зонах субдукции, серпентинизации, рифтогенеза – везде, где кора подвергается механическому сжатию или растяжению.

СГФТ сами могут являться ядрами зарождения и распространения трещин, которые, как правило, идут в направлении, перпендикулярном направлению сжатия. Таким образом, трещины от разных СГФТ могут пересекаться, обеспечивая их «короткое замыкание» и перераспределение флюида.

Рассмотрим ход предполагаемого землетрясения на примере двух СГФТ, расположенных на разных уровнях (Рис. 1). Давление в каждой СГФТ равно литостатическому, с другой стороны, оно должно удовлетворять уравнению состояния (1). При возникновении трещины, соединяющей СГФТ, происходит перераспределение давления в соответствии с параметрами каждой СГФТ и гидродинамическими условиями всей системы «СГФТ-трещина». Среднее давление p_3 , которое будет устанавливаться в обоих СГФТ, определяется их параметрами и прежде всего объемами и уровнями залегания. Не учитывая разницу температур и гидростатическое давление флюида в системе трещин, результирующее давление можно оценить по формуле:

$$p_3 \approx \rho g H_2 \frac{V_2}{V_1 + V_2} + \rho g H_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

Если уменьшение давления в СГФТ1 достигнет предела прочности, то произойдет обрушение блока I (Рис.1). Если увеличение давления в СГФТ2 достигнет своего предела прочности, то произойдет взброс блока II. Если вторичная система трещин II (Рис.1) приведет к контакту СГФТ2 с атмосферой, то после взброса может произойти обратное падение блока II, т. к. давление в СГФТ2 станет равным атмосферному. Описанное выше обрушение блока I можно отнести к моменту главного удара. Максимальная энергия этого удара будет, очевидно, равна $\rho g (H_2 - H_1) S_I$, где S_I - сечение блока I. Отметим, что известное эмпирическое соотношение между магнитудой землетрясения и линейным размером сейсмического очага [9] хорошо согласуется с формулой для энергии главного удара. Действительно, эта энергия пропорциональна сечению обрушившегося блока, или квадрату его линейного размера. Следовательно, увеличение линейного размера блока в три раза (сечение увеличивается в 9 раз), должно увеличивать магнитуду землетрясения приблизительно на единицу, что и подтверждают данные, приведенные в [9].

Вскрытие трещин в зоне I, соответствующие сейсмические толчки, перекачка флюида из СГФТ1 в СГФТ2 (поскольку этот процесс идет под давлением в узких трещинах, он может сопровождаться гулом) разумно рассматривать как форшоковые события. При обрушении блоков I и II происходит инъекция флюида (он может находиться в закритическом состоянии) внутрь всей системы трещин и активизация других СГФТ, которые оказались в зоне «короткого замыкания», то есть в сейсмическом очаге.

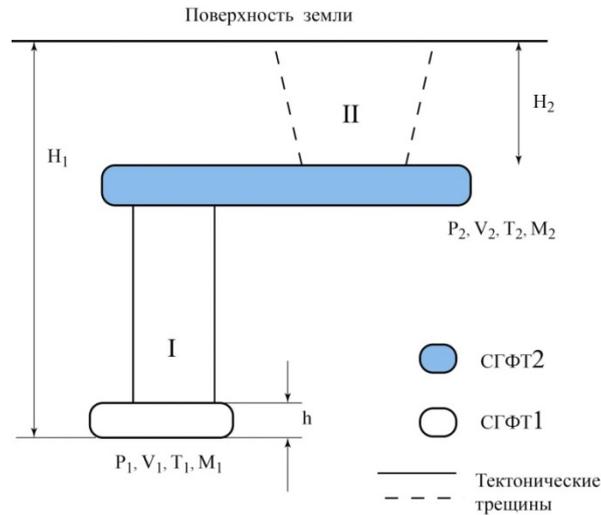


Рис. 1. Условное изображение двух СГФТ на разных глубинах. Тектонические трещины соединяют («замыкают») их между собой и (или) с поверхностью Земли.

Уменьшение температуры флюида при его адиабатическом расширении, а также его выход в зону более низких температур, запускает процесс конденсации флюида с соответствующим падением давления насыщенных паров. Это может служить дополнительной причиной разнообразных афтершоковых проявлений. Особенности процесса землетрясения в модельной структуре демонстрирует качественный вид зависимости от времени давления в двух СГФТ (Рис.2).

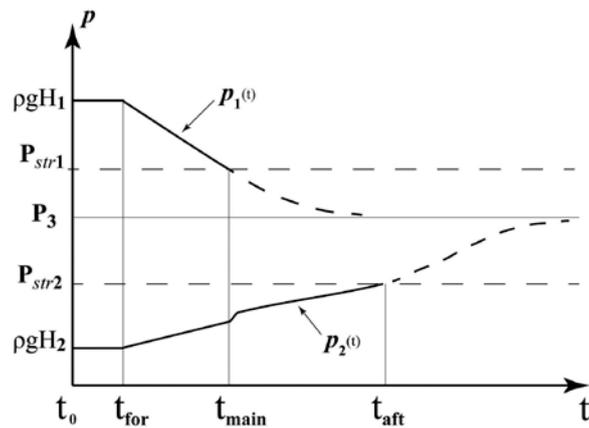


Рис. 2. Зависимость от времени давлений флюида в двух СГФТ (Рис.1), замкнутых тектонической трещиной. P_{str} - значения предельных давлений флюида, при которых происходит обрушение или взброс блоков в соответствующих СГФТ

В момент t_0 начинается образование тектонических трещин в породе. t_{for} - это момент «короткого замыкания» флюидных областей одной или несколькими трещинами. Начинается перераспределение давления между СГФТ и соответствующий отсчет форшоковых событий. В момент t_{main} давление на СГФТ1 достигает предела прочности и происходит обрушение блока I. Это момент главного удара. Давление в СГФТ2 продолжает расти, этот процесс может усиливаться после обрушения СГФТ1 и инъекции флюида из СГФТ1 через систему трещин внутрь СГФТ2 (скачок на кривой p_2). Если давление внутри СГФТ2 достигает своего предела прочности (момент t_{aft}), происходит взброс блока II и начало афтершоковых событий, которые могут продолжаться, пока поле давления в системе трещин и СГФТ не придет в равновесное состояние. Длительность афтершоков будет зависеть от протяженности и параметров системы трещин, по которым происходит перекачка флюида.

Понятно, что рассмотренная система СГФТ является чрезвычайно упрощенной. В роли СГФТ2 может выступать и сама система трещин, имеющая суммарный объем V_2 , по которой будет распределяться поступающий из СГФТ1 флюид. Соответствующее повышение флюидного давления в СГФТ2 будет предшествовать главному удару – сбросу блока I над СГФТ1.

Ряд наблюдений и эмпирических данных, опубликованный в работах [5,6,9], хорошо согласуется с вышеизложенным механизмом землетрясения. Речь идет, прежде всего, об эмиссии различных газов (в том числе и горючих) перед, во время и после главного удара. Эти газы, часто имеющие повышенную температуру, - суть флюиды, поднявшиеся по трещинам и разломам из зоны «глубоких» СГФТ1 в зону «мелких» СГФТ2 или непосредственно на поверхность земли. Они могут увеличивать поровое давление флюидов на соответствующих уровнях, как это произошло во время землетрясения в Аквиле (2009 г.) перед форшоком, а также изменять соотношения v_p / v_s в области, примыкающей к сейсмическому очагу, что свидетельствует о появлении дилатансий, заполненных флюидом [10]. События в Аквиле вполне могут трактоваться как следствие перекачки флюида из СГФТ1 в зону СГФТ2, где был сначала превышен порог прочности (произошел форшок с $M=4$), а затем преодолен и предел прочности кровли в СГФТ1 с обрушением соответствующего блока и главным ударом ($M=6,3$).

Интенсивное движение и перекачка флюидов из нижних горизонтов в верхние в процессе «короткого замыкания» СГФТ, расположенных на разных уровнях, может приводить к разного рода геофизическим явлениям. Если трещины, по которым перемещается флюид, не достигают поверхности, то рост давления в верхних СГФТ может сопровождаться «разбуханием» соответствующих геологических структур, увеличением их размеров, что было зафиксировано в Японии в качестве предвестника землетрясения [9]. Таким образом, подготовка землетрясения, с нашей точки зрения, включает в себя два процесса: накопление флюидов в виде СГФТ на разных глубинах и накопление тектонических напряжений в соответствующей системе блоков. Вскрытие трещин и замыкание

нескольких СГФТ – необходимое условие землетрясения. Разрушение СГФТ – достаточное условие. Сила землетрясения зависит от того, какие СГФТ и на каких глубинах задействованы в процессе их «короткого замыкания». Магнитуда главного удара землетрясения должна определяться параметрами H, h, S, T, R наиболее глубокой СГФТ и размерами обрушившегося блока.

Зоны разломов (рифт, субдукция) облегчают замыкание СГФТ, делая его более вероятным. Зоны высокой сейсмичности – это области, где тектоническое (или иное) образование трещин происходит наряду с относительно высокой скоростью генерации и аккумуляции флюидов при наличии достаточного количества непроницаемых для них слоев (ловушек и покрышек). «Затишье» может быть объяснено накоплением флюида в опустошенных землетрясением СГФТ. Возможно, «затишье» наступает, когда аккумуляция флюида идет в самом крупном СГФТ, и понадобится достаточно протяженная макротрещина, чтобы «замкнуть» СГФТ и, например, атмосферу. В этом случае падение давления в СГФТ и соответствующий сейсмический удар будут максимальными.

Таким образом, мы не отвергаем механизм тектонических напряжений и образования макроразрывов путем самоорганизации трещин при достижении некоторого критического состояния. Мы утверждаем, что этот механизм необходим, но не достаточен. Он приводит в действие механизм гидродинамического замыкания флюидонасыщенных тел, благодаря которому и осуществляется сейсмический удар и высвобождение сейсмической энергии. Фрактальность блоковой структуры может существовать сама по себе. Она формирует сеть трещин, которые дают пути перекачки флюидов, а те, в свою очередь, перераспределяются по соединенным трещинами СГФТ. В результате образуется новое поле порового давления флюида. В тех местах, где это давление превысило предел прочности, происходит подвижка и сейсмоудар.

2 Вулканические извержения и их возможный механизм

Современные научные представления о структуре земного шара базируются на том, что твердая оболочка Земли – земная кора – образовалась вследствие остывания ювенильного магматического расплава, который до сих пор находится на глубинах в несколько десятков километров и время от времени прорывается на поверхность земли в результате вулканических извержений. Вопрос о природе и механизме этих извержений пока остается открытым. Существует немало теорий вулканизма [11], но они пока полностью не удовлетворяют научное сообщество. Разнообразие типов вулканов создает простор для научной мысли, однако потребность в простом, физически ясном и «универсальном» механизме вулканического извержения нисколько не уменьшается. Возможно, знание подобного механизма (если он, действительно, существует) позволило бы уверенно предсказывать извержения с катастрофическими последствиями.

Механизм перегретого «парового котла», предложенный еще в начале XIX века, был отвергнут, т. к. не нашел ни теоретических, ни экспериментальных подтверждений. Взамен этой идеи был предложен комплекс представлений об

избыточном давлении магмы, ее обогащении летучими или, наоборот, дегазации [11,12]. Нелинейная теория катастроф, популярная в последнее время, объяснила многие важные обстоятельства, но не смогла ответить на главные вопросы. Необходим универсальный механизм, способный объяснить и медленное, спокойное истечение лавы, и ее фонтанирование, и выбросы со сверхзвуковой скоростью раскаленной пироклаستيку, и кальдерообразующие катастрофы с кубическими километрами извергнутых пемз и туфов, и плинианские извержения с палящими тучами, и многолетнее, едва заметное выжимание экстремальных куполов, прерываемое катастрофическими взрывами-пароксизмами.

Далее перейдем к описанию достаточно простого физического механизма, позволяющего с единых теоретических позиций обосновать различные типы вулканических извержений. В сущности, это развитие и наполнение содержанием старой идеи о том, что водяной пар (или некий его газообразный аналог) может играть ведущую роль в вулканических извержениях [11]. Однако конкретизация этой идеи стала возможной только после того, как был обнаружен и описан новый, ранее неизвестный физический механизм неустойчивости в структуре «гидростатическая жидкость» - «идеальный газ». Суть этого механизма заключается в том, что при определенных параметрах контактирующих жидкости и газа начинается их неконтролируемое взаимное перемещение: столб жидкости извергается под действием давящего на нее газа. Данный механизм, поддающийся легкой экспериментальной проверке, был описан и апробирован в работах [13,14]. Он позволил объяснить не только феномен гейзера как такового, но и многие особенности поведения природных гейзеров Камчатки и Йеллоустона. Механизм «газового поршня» носит фундаментальный характер: природа жидкости и газа, так же как и их плотность, вязкость и температура не играют в нем принципиальной роли. Ниже мы приводим теоретическое описание этого механизма на модельной структуре «жидкость – газ», даем основные уравнения динамики и критерий неустойчивости. В дальнейшем мы покажем, как этот механизм может функционировать в случае вулканических извержений.

Суть этого механизма, названного в [4] GLI (Gas-Liquid-Imbalance)-механизмом, заключается в следующем (Рис.3). Если жидкость, заполняющая до краев резервуар (например, вертикальный канал) с твердыми стенками, имеет контакт на глубине H с замкнутым объемом газа, то их равновесие становится неустойчивым, когда объем газа V превышает критическую величину V_{cr} :

$$V_{cr} = \gamma S(H + p_0 / \rho g) \quad (3)$$

где S – сечение канала в области контакта, γ - коэффициент адиабаты для данного газа,

ρ - плотность жидкости, p_0 - атмосферное давление, g - ускорение силы тяжести.

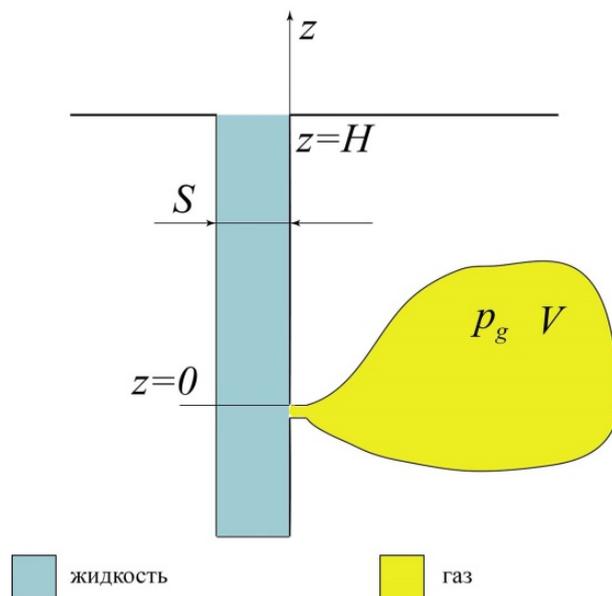


Рис. 3. Схема контактирующих объемов газа и жидкости

Критерий (3) возникает из следующих простых соображений. Предположим, что объем газовой полости увеличился на малую величину ΔV за счет того, что часть газа проникла в канал. В этом случае из канала будет вытеснен такой же объем жидкости ΔV , равный $S\Delta z$, где Δz - уменьшение высоты столба жидкости, S – сечение канала. Соответствующее уменьшение гидростатического давления жидкости Δp_l в области контакта равно: $\Delta p_l = \rho g \Delta z = -\rho g \Delta V / S$. Давление в объеме газа тоже упало на величину Δp_g , которая в соответствии с уравнением состояния идеального газа $p_g V^\gamma = A = const$ равна:

$$\Delta p_g = \frac{\partial p_g}{\partial V} \Delta V = -\frac{\gamma A}{V^{\gamma+1}} \Delta V$$

Условие неустойчивости $|\Delta p_g| < |\Delta p_l|$ с учетом изначального равенства давлений жидкости и газа в области контакта непосредственно приводит к критерию (3). Если $V > V_{cr}$, то при расширении газа в область канала (и удалении из канала соответствующего объема жидкости), давление в газовом объеме будет оставаться больше гидростатического давления жидкости, в зоне контакта возникнет нарастающий перепад давления, и столб жидкости начнет извергаться под давлением газа. Критическое условие (3) не зависит от формы канала и наличия в нем расширений.

Например, в случае гейзерного извержения, жидкость – это вода, газ – водяной пар, скапливающийся при кипении воды в подземной полости («бойлере»). Соответственно, $\gamma = 1,4$; $p_0 / \rho g = 10 м$. Величина, стоящая справа в (3), пред-

ставляет собой некий критический объем V_{cr} . Если объем газовой полости V значительно превышает V_{cr} , то перепад давления между газом и жидкостью будет увеличиваться, извержение жидкости будет носить ускоряющийся характер до тех пор, пока, например, вся жидкость не будет вытолкнута из канала и газ не выйдет наружу. Если $V < V_{cr}$, неустойчивости нет, газ спокойно проникает в жидкость, не выталкивая ее, и выходит на поверхность в виде всплывающих пузырей.

Таким образом, достаточным условием неустойчивости и извержения воды является превышение объема пара в бойлере над критическим объемом, равным $(H + 10)S\gamma \text{ м}^3$, где H - глубина залегания бойлера (Рис.3), S - сечение канала в месте его контакта с бойлером, γ - коэффициент адиабаты, для водяного пара равный 1,4. Извержение начинается, как только пар проникает в канал, а вода в канале достигает поверхности земли (Рис.4).

Если объем бойлера и соответствующий объем пара достаточно велики, то падение давления пара во время извержения будет незначительным, и пар будет выбрасывать наружу не только всю содержащуюся в канале воду, но и воду из возможных расширений канала (Рис.5). Последнее обстоятельство объясняет весьма длительные по времени (несколько часов) извержения некоторых гейзеров Йеллоустона и Камчатки.

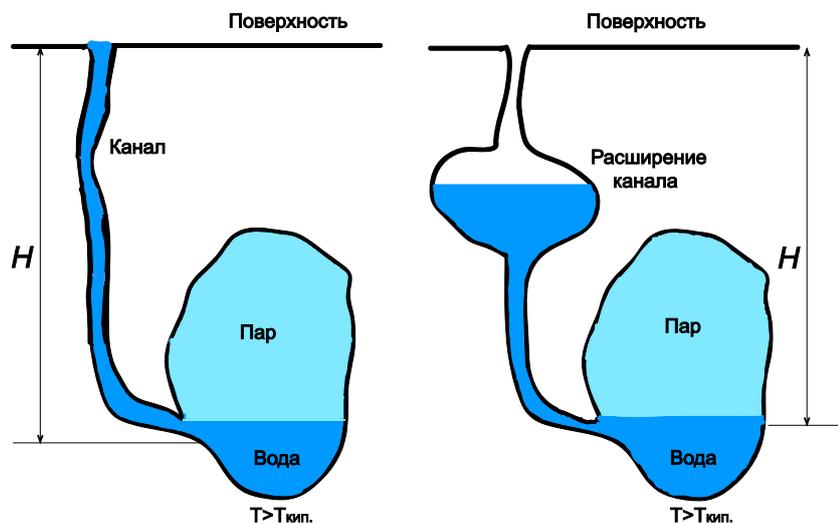


Рис. 4. Начало извержения гейзера: пар начинает проникать в канал.

Рис. 5. Структура гейзера с расширением канала. Извержение может продолжаться до тех пор, пока не освободится от воды все расширение канала.

«Классическая» теория работы гейзера предполагает нагрев воды в канале до температуры кипения и затем ее вскипание снизу вверх по высоте канала с сопутствующим увеличением объема и извержением. Для GLI – механизма в случае гейзера кипение так же необходимо, но только как источник водяного пара в верхней части «бойлера» (Рис.5). Накапливающийся при кипении пар расширяется и выдавливает воду в канал и затем наружу – этот процесс и составляет, так называемую, фазу излива. Ее длительность, очевидно, зависит от параметров бойлера. Кстати «классическая» теория гейзера не способна объяснить длительный излив воды перед извержением. Излив может совсем отсутствовать, если пар начинает проникать в канал до того, как вода в канале достигнет поверхности земли. Извержение в этом случае наступает сразу, как только при выходе воды на поверхность происходит сброс гидростатического давления в канале. Так без излива извергаются гейзеры Фонтан и Двойной в Долине Гейзеров на Камчатке.

Опыт, необъяснимый с точки зрения классической теории гейзера, был «поставлен» самой природой во время катастрофы 3 июня 2007 года в Долине гейзеров на Камчатке, когда колоссальная обломочная лавина перегородила русло реки Гейзерной и образовала подпрудное озеро глубиной 20 метров. В результате гейзер Большой, который находился на склоне в 15 метрах над уровнем реки (Рис. 6), оказался под водой и, естественно, перестал извергаться. В сентябре 2007 года уровень озера упал на несколько метров, и грифон гейзера «высунулся» из-под воды. И сразу же гейзер начал извергаться почти в том же режиме, что и раньше (Рис.7).



Рис. 6. Гейзер Большой (в левом углу) до катастрофы 2007 года



Рис. 7. Извержение гейзера Большой над поверхностью нового озера.

При этом после извержения опустевший канал гейзера быстро заполнялся водой из озера через неровные края грифона (Рис.8). Отметим, что температура озерной воды составляла 25°C, в канал гейзера поступало несколько тонн такой воды (поперечник канала примерно 1 м x 1 м, глубина 4 м). Очевидно, что нагреть это количество воды за час до температуры кипения невозможно даже на открытом огне, а температура на дне канала была всего 120°C. Но всего через час гейзер вновь начинал извергаться (Рис. 9), и этому извержению предшествовал излив.

Очевидно, для GII – механизма принципиально, что внутренняя, подземная, структура гейзера Большой сохранилась неизменной после катастрофы, и поэтому, как только у гейзера появилась возможность сброса гидростатического давления воды в канале (уровень озера упал ниже краев грифона), гейзер начал извергаться.

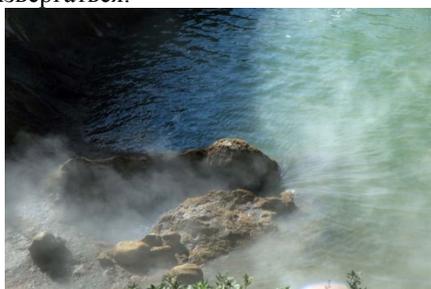


Рис. 8. Канал Большого заполняется водой озера.



Рис. 9. Гейзер Большой. Начало извержения.

Эффективность работы гейзера зависит от соотношения объема пара в бойлере и критического объема, пропорционального глубине залегания бойлера и сечению канала в месте его контакта с бойлером. У ряда гейзеров (например, Большой и Великан в Долине Гейзеров) имеется достаточно широкий выход канала на поверхность, и извержение происходит не ровной, мощной струей воды (как из брандспойта), а чередой «кинжальных» выбросов, идущих друг за другом. Возможно, это обусловлено наличием узкой щели (трещины), связывающей бойлер с каналом, по аналогии с Рис.10.

Предполагаемое существование подобной «щели» было подтверждено фиксацией процесса подготовки извержения гейзера Большой с помощью термостойкой видеокамеры, опущенной в канал гейзера [13]. Непосредственно перед началом извержения был зафиксирован интенсивный выброс пара из боковой трещины, находящейся вблизи дна канала гейзера. Никакого кипения воды в канале при этом не наблюдалось.

Показательным примером верификации GII- механизма является объяснение необычного поведения гейзера Beehive (Пчелиный Улей) в Йеллоустонском Национальном парке (США). Этот гейзер известен тем, что за 10-15 минут до его основного извержения начинает извергаться маленький фонтанчик из отверстия в нескольких метрах от главного грифона гейзера. Его называют Индика-

тором (Bee Hive Indicator). Рейнджеры национального парка могут, таким образом, предсказывать начало главного извержения, период которого достигает иногда десяти часов и которое выбрасывает воду на высоту до 60 метров.

Подобное «парадоксальное» поведение гейзера достаточно легко объясняет GLI-механизм с предполагаемой структурой гейзера, изображенной на Рис. 11. Вначале пар в бойлере достигает канала 1 и начинается извержение Индикатора. Поскольку, вероятно, этот канал очень узкий, скорость выброса воды относительно мала (фонтанчик невысокий) и извержение не успевает закончиться до того момента, как пар в бойлере достигнет основного канала и не начнется главное извержение Пчелиного Улья. Таким образом, давление пара в бойлере поддерживается на высоком уровне (оба канала заполнены водой) и оба фонтана работают одновременно.

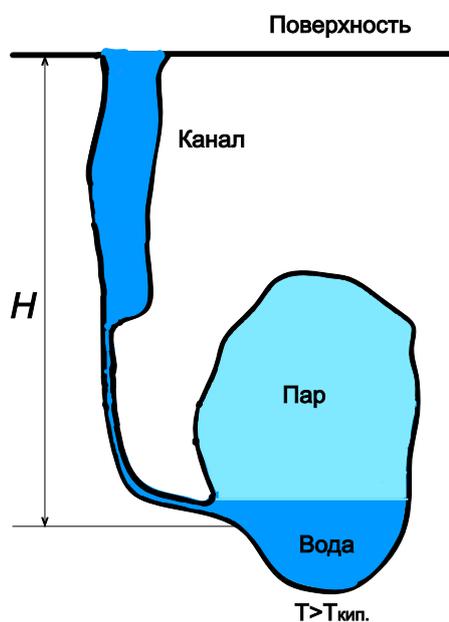


Рис. 10. Предполагаемая структура гейзера с широким каналом и узкой щелью, соединяющей бойлер и канал.

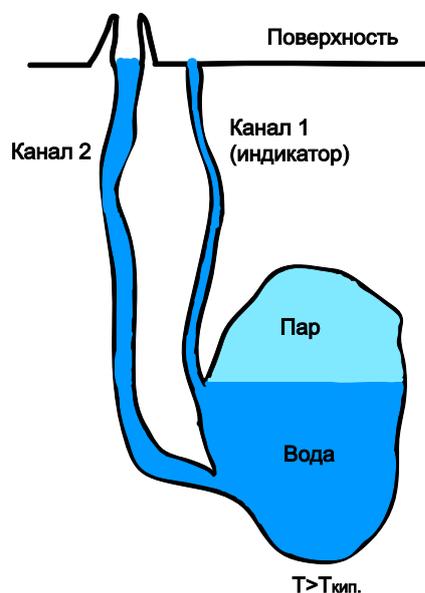


Рис. 11. Предполагаемая структура гейзера Пчелиный Улей. Бойлер соединен с поверхностью двумя каналами

Покажем также, каким образом GLI-механизм дает объяснение работе другой примечательной группы гейзеров Йеллоустонского национального парка. Это гейзеры Грэнд (Великий), Вент (Клапан, Отверстие) и Тюрбан. Извержение этих, расположенных близко друг от друга, гейзеров отличается своеобразностью. Период покоя составляет от 5 до 15 часов. Сначала заполняются водой пустые грифоны гейзеров. Это может продолжаться несколько часов. Затем начинает работать гейзер Тюрбан. Его невысокое «извержение» длится не-

сколько минут, потом может прекратиться, потом возобновляется, и так может повторяться до десятка раз. Наконец, после одного из подобных извержений Тюрбана начинает извергаться Грэнд. Одновременно с ним начинает работать Вент. Извержение Грэнда длится до 10 минут и может состоять из нескольких мощных выбросов, в промежутке между которыми фонтан Грэнда резко ослабевает или исчезает совсем. При этом Вент продолжает работать. Когда Грэнд перестает извергаться, Вент продолжает парить – фаза парения у него очень хорошо выражена. Грэнд и Тюрбан вообще не парят.

Вряд ли «классическая» теория гейзера способна объяснить такую сложную конфигурацию поведения трех взаимосвязанных гейзеров. GLI-механизм, однако, позволяет это сделать достаточно просто. Рассмотрим гипотетическую структуру гейзера с одним бойлером и тремя каналами с расширениями (Рис.12).

Скапливающийся у свода бойлера водяной пар выжимает воду в каналы гейзеров, они заполняются, начинается фаза излива. Вначале пар достигает канала гейзера Тюрбан. Сечение этого канала S_2 , вероятно, достаточно велико, и критический объем для гейзера Тюрбан всегда больше, чем объем накапливающегося пара. Полноценное извержение гейзера не происходит, пар выталкивается порциями, которые всплывают на поверхность в виде бурунов, имитирующих небольшое извержение. Продолжается излив из каналов гейзеров Грэнд и Вент, но настоящее их извержение наступает, когда пар в бойлере достигает глубины, где расположен выход в их совместный канал с сечением S_1 (Рис.13).

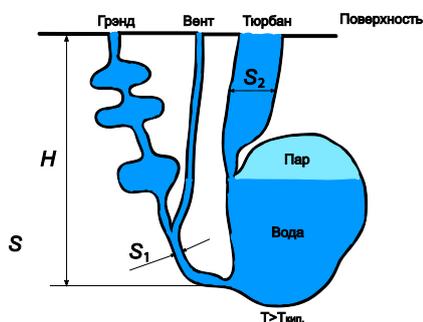


Рис. 12. Предполагаемая структура гейзеров Грэнд, Вент и Тюрбан. Канал Грэнда имеет несколько расширений. Канал Вента очень узкий. Канал Тюрбана, напротив, широкий. Источники воды, питающие гейзеры, не показаны.

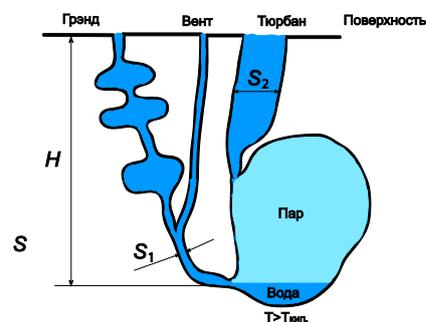


Рис. 13. Структура гейзера Грэнд перед началом основного извержения

Теперь объем пара значительно превышает критический объем, равный приблизительно величине $1,2HS_1$, и начинается извержение из обоих каналов. Поскольку канал Вента – узкий, гидродинамическое сопротивление в нем потоку воды очень большое, скорость выброса воды соответственно невелика и фонтан

невысокий. У гейзера Грэнд, очевидно, канал более свободен и скорость разгона воды в нем выше, фонтан бьет на высоту десятков метров. По мере извержения и выбрасывания воды, пар распространяется из бойлера внутрь канала гейзера Грэнд, где ему приходится заполнять расширения канала (Рис.14).

В эти моменты давление пара может уменьшаться сильнее, чем гидростатическое давление воды в канале, фонтан будет слабеть, извержение может почти прекратиться. Но как только пар в канале достигнет очередного сужения между расширениями, перепад давления между паром и столбом воды опять начнет нарастать и извержение начнет усиливаться.

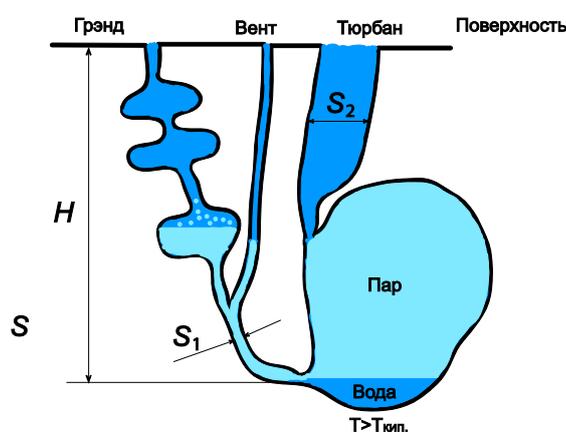


Рис. 14. Извержение гейзеров Грэнд и Вент.

При этом Вент перейдет в фазу парения, что хорошо видно на всех видеосюжетах, размещенных на youtube.com. Фактически Вент оправдывает свое название (на русский он переводится как «отверстие» или «клапан»): в фазе парения он стравливает давление пара внутри общего для всех гейзеров бойлера, что само по себе может приводить к ослаблению извержения Грэнда. Характерно, что Тюрбан и до, и во время извержения Грэнда ведет себя одинаково «скромно», подтверждая, что его критический объем значительно превышает объем пара в бойлере. Извержение заканчивается потому, что давление пара в бойлере уменьшается благодаря Венту. Оставшаяся вода в каналах гейзеров Грэнд и Тюрбан, предотвращая их парение, уходит вниз, внутрь структуры, сохраняя и сжимая оставшийся пар в бойлере. Гейзер начинает новый цикл, заполняясь водой из подземных источников.

3 Заключение

Результаты выполненных теоретических исследований механизмов землетрясений и вулканических извержений говорят о том, что важная роль в этих механизмах отводится глубинным флюидонасыщенным зонам, физические парамет-

ры которых (давление, объем) определяют условия начала тех или иных катастрофических событий внутри земной коры.

Аналогия между извержениями гейзеров и фонтанированием базальтовой магмы при извержениях вулканов достаточно очевидна, а GLI-механизм дает ее физическое обоснование. При этом скорость истечения магмы напрямую определяется длиной и сечением магматического канала, наличием в нем расширений, а также вязкостью магмы. Для случая вулканов жидкость – это магма, а газ – это флюид (например, водяной флюид), находящийся в закритическом состоянии (для воды это состояние возникает при $T > 647K$ и давлении, превышающем 220 Бар), что обуславливает его поведение по закону идеального газа и соответственно работу GLI-механизма.

Литература

1. Кольская сверхглубокая. М., Недра, 1984, 492 с.
2. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. М., Наука, 2009, 328 с.
3. A.Nechayev. Tectonic "short-circuit" of sub-horizontal fluid-saturated bodies as a possible mechanism of the earthquake. Arxiv: 1307.4915, 2013
4. Nechayev A. Magma, Crust and Fluid: Critical Conditions of their Interaction and Types of Volcanic Eruptions. Applied Physics Research, v.7, №6, pp75-84, 2015
5. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М., Наука, 2003, 270с.
6. Thomas Gold. Earthquakes. "Taking the Back of the Watch". Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 2012
7. T.Gold, S.Soter Fluid Ascent through the Solid Lithosphere and its Relation to Earthquakes. PAGEOPH, vol.122 (1984/85), p.492-522
8. Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. Термофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях. М., Энергоатомиздат, 1989, 232с.
9. Никонов А.А. Землетрясения. Прошлое, современность, прогноз. М., URSS, 2009, 192с
10. M.K.Savage. The role of fluids in earthquake generation in the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and its foreshocks. Geology, 2010, v.38, № 11, p.1055-1056
11. Parfitt, E.A., & Wilson, L. (2008). Fundamentals of Physical Volcanology. Oxford: Blackwell Publishing. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016756809006074>
12. Parfitt, E.A. (2004). A discussion of the mechanisms of explosive basaltic eruptions, J. Volcanol. Geoth. Res., 134, 77-107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.01.002>
13. Belousov, A., Belousova, M., & Nechayev, A. (2013). Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for geyser mechanism, Geology, 41, 387-390. <http://dx.doi.org/10.1130/G33366.1>

References

1. Kol'skaya sverkhglubokaya. M., Nedra, 1984, 492 s.
2. Kissin I.G. Flyuidy v zemnoy kore. M., Nauka, 2009, 328 s.

3. A.Nechayev. Tectonic "short-circuit" of sub-horizontal fluid-saturated bodies as a possible mechanism of the earthquake. Arxiv: 1307.4915, 2013
4. Nechayev A. Magma, Crust and Fluid: Critical Conditions of their Interaction and Types of Volcanic Eruptions. Applied Physics Research, v.7, №6, pp75-84, 2015
5. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Fizika zemletryaseniy i predvestniki. M., Nauka, 2003, 270s.
6. Thomas Gold. Earthquakes. "Taking the Back of the Watch". Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 2012
7. T.Gold, S.Soter Fluid Ascent through the Solid Lithosphere and its Relation to Earthquakes. PAGEOPH, vol.122 (1984/85), p.492-522
8. Zubarev V.N., Kozlov A.D., Kuznetsov V.M. Termofizicheskiye svoystva tekhnicheskii vazhnykh gazov pri vysokikh temperaturakh i davleniyakh. M., Energoatomizdat, 1989, 232s.
9. Nikonov A.A. Zemletryasiya. Proshloye, sovremennost', prognoz. M., URSS, 2009, 192s.
10. M.K.Savage. The role of fluids in earthquake generation in the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and its foreshocks. Geology, 2010, v.38, № 11, p.1055-1056
11. Parfitt, E.A., & Wilson, L. (2008). Fundamentals of Physical Volcanology. Oxford: Blackwell Publishing. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016756809006074>
12. Parfitt, E.A. (2004). A discussion of the mechanisms of explosive basaltic eruptions, J. Volcanol. Geoth. Res., 134, 77-107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.01.002>
13. Belousov, A., Belousova, M., & Nechayev, A. (2013). Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for geyser mechanism, Geology, 41, 387-390. <http://dx.doi.org/10.1130/G33366.1>

Fluid-saturated bodies in the Earth's crust and possible mechanisms of volcanic eruptions and earthquakes

A.M. Nechayev

Faculty of Geography, Lomonosov MSU, Moscow, Russia

E-mail: logata@yandex.ru

Abstract. The results of theoretical studies of the mechanisms of earthquakes and volcanic eruptions are accumulated. A special role in these mechanisms is assigned to deep-seated fluid-saturated zones, whose physical parameters (pressure, volume) determine the conditions for the onset of certain catastrophic events inside the earth's crust.

Keywords: volcano, earth crust, fluid, earthquake mechanism, volcanic eruption mechanism, fluid-saturated zones.