

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

А.В. Доманский, В.В. Ершов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1б, Россия

Выполнено математическое моделирование деятельности грязевых вулканов. На основе классических моделей механики сплошных сред осуществлено математическое описание нестационарных процессов фильтрации газа и двухфазной фильтрации газа и водоглинистой брекчии в подводящем канале вулкана, поршневого вытеснения газом брекчии из тела вулкана в квазистационарном приближении с последующим истечением газа в атмосферу. При расчетах учитывается зависимость вязкости и коэффициента сжимаемости газа от температуры и давления газа. Сформулирована обратная задача по определению глубины залегания корня грязевого вулкана и получено ее однозначное решение. Показано, что основным параметром, определяющим глубины залегания корня грязевого вулкана и источника газа, является проницаемость подводящего канала. Выявлено, что отношение вязкостей газа и водоглинистой брекчии задает основной интервал времени между двумя последовательными извержениями грязевого вулкана. Численно получена оценка доли водоглинистой брекчии, оставшейся в подводящем канале к моменту извержения вулкана. На основе представлений о гидроразрывах в теле вулкана предложена модель образования грифонного поля и получены оценки мощности тела вулкана. Дана оценка скорости истечения газа из тела вулкана в начале извержения.

Фильтрация геофлюидов, грязевые вулканы, математическое моделирование, численные методы.

FLUID-DYNAMIC MODELING OF MUD VOLCANISM

A.V. Domanskii and V.V. Ershov

The eruptive behavior of mud volcanoes has been explored in several forward and inversion models. The forward models, based on classical continuum-mechanics, simulate the nonstationary processes of gas seepage and two-phase gas-mud flow through the conduit of a mud volcano, as well as the quasi-stationary gas frontal drive that pushes mud out, and the subsequent gas escape into the air. Forward modeling is performed with reference to the pressure and temperature dependence of the gas viscosity and compressibility. The inversion for the depth to the mud column base has yielded an unambiguous solution. According to the modeling results, the depths to the mud base and to the gas reservoir are controlled mainly by conduit permeability, while the interval between two successive eruption events depends on the gas/mud viscosity ratio. The modeling has allowed estimates for the mud breccia portion remaining in the conduit by the time of eruption, and for the subsurface volcano thickness inferred using a hydraulic-fracture model of the related gryphon field, and for the rate of gas release at the beginning of an eruption.

Mud volcano, filtration flows of gas and mud, modeling, simulation techniques

ВВЕДЕНИЕ

Грязевые вулканы — это природные флюидодинамические системы, в которых происходят процессы интенсивного массопереноса из недр Земли на ее поверхность. Подводящие каналы грязевых вулканов приурочены к крупным тектоническим разрывным нарушениям в земной коре [Якубов и др., 1980; Каракин и др., 2001], которые являются участками с повышенной флюидопроницаемостью. Под действием высоких пластовых давлений по этим каналам на земную поверхность выносятся газообразные флюиды и разжиженные осадочные породы (водоглинистая брекчия). В деятельности грязевых вулканов выделяют две стадии — бурного извержения и относительно спокойную грифонную. Грязевой вулканизм широко распространен по всей планете, особенности распределения грязевых вулканов на Земле подробно рассмотрены в работе [Холодов, 2002].

Состав продуктов деятельности грязевых вулканов, интенсивность их выноса в грязевулканических структурах изменяются во времени и находятся в тесной связи с протекающими в земной коре сейсмотектоническими процессами [Лагунова, 1974; Гемп и др., 1979; Осика, 1981; Войтов, 2001; Астахов и др., 2002; Собисевич и др., 2005; Martinelli, Dado, 2005; Yang et al., 2006; Ершов и др., 2008; Мельников и др., 2008]. В настоящее время характер указанной связи, как и механизм самой грязевулканической

кой деятельности, известны лишь в общих чертах. За весь период изучения грязевого вулканизма, который составляет около 150 лет, хорошо исследованы геологические аспекты этого явления, строение и морфология грязевых вулканов. Однако для более глубокого понимания физической природы грязевулканических процессов, уточнения характера и особенностей их связи с сейсмотектоническими процессами в земной коре необходимо адекватное математическое описание деятельности грязевых вулканов.

КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В одной из первых работ по моделированию динамики геофлюидов в грязевулканических структурах [Горкун, Сирьк, 1967] в основу модели положено решение уравнения стационарного движения газа в скважине с открытым устьем. Предполагалось, что извержение вулкана есть процесс течения газа по решетчатой в поперечном сечении скважине со средним диаметром 0.33 м. Оказалось, что для Главного Пугачевского грязевого вулкана (о. Сахалин) обратная задача по определению глубины залегания источника газа имеет два решения, т.е. при прочих равных условиях давление газа на устье скважины одинаково для двух разных глубин источника газа. По выполненным в указанной работе расчетам одно решение отвечает глубине 2300 м, а другое — глубине 40 м. Это интерпретировалось как наличие двух питающих вулкан газовых залежей — «первичной» (2300 м) и «вторичной» (40 м). По нашим расчетам, решения, полученные для выбранных в этой работе параметров модели, соответствуют глубинам 2300 и 25 400 м. Решения, отвечающего глубине 40 м, не существует.

Отметим, что грязевулканическая деятельность имеет явно выраженный нестационарный и квазипериодический характер. Соответственно ее моделирование на основе стационарных уравнений является не совсем адекватным. Кроме того, используемое в указанной работе значение коэффициента сжимаемости газа выбрано практически произвольно.

В работах [Каракин, Каракин, 2000; Кузнецов, Каракин, 2002] считается, что формирование и деятельность грязевых вулканов определяются автоколебательными процессами в коровых волноводах на глубинах 10—15 км, которые создают в земной коре восходящие и нисходящие флюидные потоки. При наличии разломов в зоне восходящих флюидных потоков образуются грязевые вулканы. Подводящий канал грязевого вулкана моделируется вертикальным цилиндрическим каналом, по которому движется двухфазная сплошная среда — флюид и высоковязкий сжимаемый скелет. Это движение описывается изотермической системой уравнений компакти. В работе [Каракин, Каракин, 2000] дано решение прямой задачи для начального колоколообразного возмущения. Это начальное возмущение либо стремится к волновому решению, либо со временем схлопывается. Предполагается, что выбросы грязевых вулканов связаны с движением по каналу стационарных уединенных волн.

Предложенная в работе [Кузнецов, Каракин, 2002] концепция флюидного режима земной коры описывает процессы движения геофлюидов за геологическое время. Там же указано, что периоды автоколебаний коровых волноводов составляют тысячи и десятки тысяч лет, а периоды автоколебаний в глубоких разломах — сотни и тысячи лет. Однако анализ периодичности извержений грязевых вулканов Азербайджана за последние два столетия, выполненный в работе [Алиев, 2006], показал, что более 60 % зафиксированных извержений происходило с интервалом до 15 лет. По-видимому, для описания грязевулканических процессов на интервалах времени порядка единиц и десятков лет необходимы другие модели.

В работе [Иванов, Гулиев, 2002] на основе известных соотношений из механики жидкости и газа сделано приближенное описание миграции свободного и растворенного газа в грязевулканических каналах. Грязевой вулканизм рассматривается как сбросовый механизм релаксации напряженных состояний, развивающихся в связи с выделением углеводородных газов, растворенных в подземных водах осадочных бассейнов. Однако в работе отсутствует подробное и последовательное математическое описание грязевулканических процессов.

В работе [Murton, Biggs, 2003] предложена модель формирования грязевулканических построек конусообразной формы, образующихся при извержениях подводных грязевых вулканов. В ее основе лежит закон Гагена—Пуазейля для установившегося течения вязкой несжимаемой жидкости в круговой цилиндрической трубе. На основе принципа изостатической компенсации между столбами грязевой смеси и морских осадочных отложений сделана оценка глубины залегания грязевулканического резервуара, питающего грязевой вулкан.

ОБЩАЯ СХЕМА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА

В данной работе предполагается, что образование трещин разлома, выходящих на дневную поверхность, является основной предпосылкой возникновения грязевого вулканизма. В области тектонического разлома по механизму нисходящей фильтрации из перекрывающих осадочных толщ образуется слой водоглинистой брекчии, подпираемый снизу природным газом, исходящим из питающего грязевой

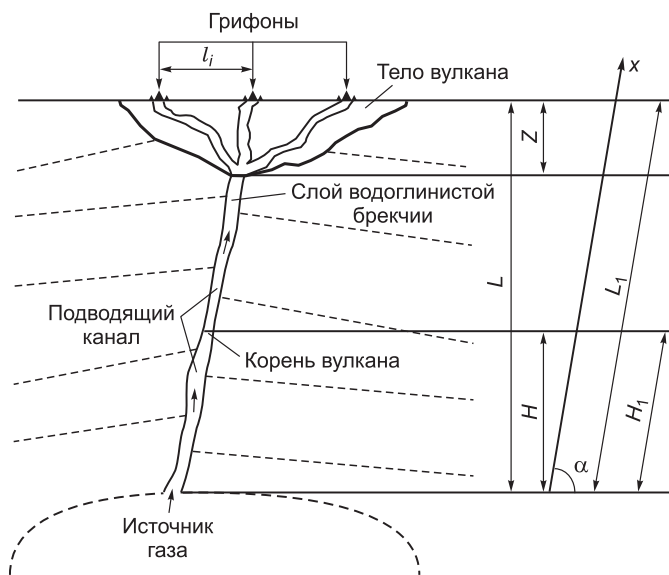


Рис. 1. Схематический разрез грязевого вулкана.

Пояснения см. в тексте.

вулкан источника газа. Подводящий канал вулкана рассматривается как заполненная брекчией и газом трещиновато-пористая среда. Между водоглинистой толщей и газом со временем устанавливается неустойчивое гравитационное равновесие, которое нарушается с ростом давления вытесняющего брекчию газа. Затем идет вытеснение газом водоглинистой брекчии до момента извержения вулкана, при котором происходит сброс давления газа. Вытеснение газом брекчии из подводящего канала является неполным, и поэтому под действием сил гравитации снова происходит заполнение подводящего канала брекчией и перекрытие доступа глубинного газа. Так происходит подготовка нового извержения вулкана. Газ, оставшийся в области смеси брекчии и газа, будет выходить на земную поверхность через систему грифонов вулкана.

Схема грязевого вулкана дана на рис. 1, где α — угол падения разломной зоны, L, L_1 — глубина залегания и длина подводящего канала, его начало соответствует началу координат, $L - H, L_1 - H_1$ — глубина залегания и длина слоя водоглинистой брекчии. На поверхности грязевого вулкана отмечены группы грифонов, под которыми находится область тела вулкана.

ФИЛЬТРАЦИЯ ГАЗА В ПОДВОДЯЩЕМ КАНАЛЕ

Между водоглинистой толщей и источником газа происходит фильтрация газа по подводящему каналу. Фильтрационное течение рассматривается в одномерном приближении. В уравнение состояния идеального газа вводится коэффициент сжимаемости, величина которого определяется глубиной залегания источника газа и зависит от температуры и давления газа. Вязкость газа также будет зависеть от этих параметров. Поэтому уравнение фильтрации газа будет нелинейным. С целью линеаризации уравнения ниже будет предложена процедура осреднения вязкости и коэффициента сжимаемости газа. При таком осреднении квадрат давления газа $p_g^2 \equiv u(x, t)$ будет удовлетворять линеаризованному уравнению фильтрации газа [Лейбензон, 1947] и соответствующим начально-краевым условиям, которые после приведения к безразмерной форме по формулам $t \rightarrow t/t_g, x \rightarrow x/H_1$ примут вид

$$\sigma u_t = u_{xx} + 2\sigma u_x, \quad u(0, t) = u_0 = \text{const}, \quad u_x(1, t) + 2\sigma u(1, t) = 0, \quad u(x, 0) = 0, \quad \sigma = \frac{\rho_0 T_0 g H}{p_0 z T}. \quad (1)$$

Здесь $u_0 = p_s^2$, p_s — пластовое давление в источнике газа, заданное на входной границе $x = 0$; на границе $x = 1$ между водоглинистой толщей и газом задан нулевой поток газа. Величины $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p_0 = 0.101325 \text{ МПа}$, ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, zT — среднее значение произведения коэффициента сжимаемости и температуры газа, g — ускорение свободного падения, t и x — индексы частных производных функции. Характерные длина и время при фильтрации газа равны H_1 и $t_g \equiv m \mu_g H_1^2 / (k p_s \sigma)$, где m, k — пористость и проницаемость подводящего канала, а μ_g — среднее значение вязкости газа.

Решение задачи (1) дает распределение давления газа в следующем виде:

$$\frac{p_g(x, t)}{p_s} = e^{-\sigma x} \sqrt{1 - 2e^{\sigma(x-t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\gamma_k}{\sigma + \sigma^2 + \gamma_k^2} e^{-\gamma_k^2 t / \sigma} \sin \gamma_k x} \equiv \Phi_0(\sigma, x, t), \quad \text{tg} \gamma_k = -\frac{\gamma_k}{\sigma}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости давления газа для разных моментов времени, рассчитанные согласно формуле (2), $\sigma = 0.2$. Отметим, что при $t \geq 1$ распределение давления газа по длине подводящего канала практически не меняется. Это указывает на достаточно быстрый выход к установившемуся режиму фильтрации газа. На рис. 3 приведены графики функции $\Phi(\sigma, t) \equiv \sigma \Phi_0(\sigma, 1, t)$ для

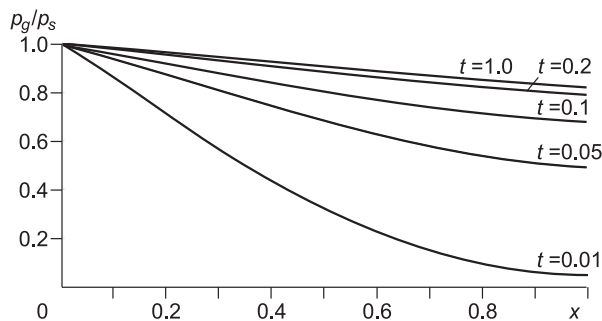


Рис. 2. Давление газа в подводящем канале (при $\sigma = 0.2$).

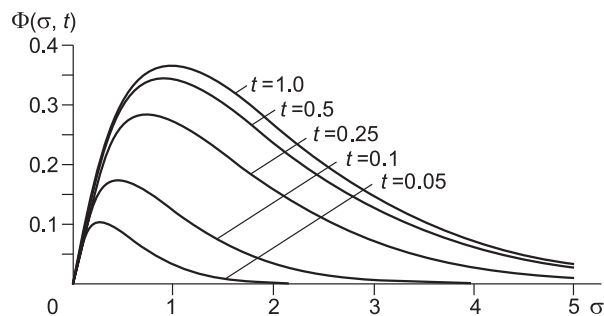


Рис. 3. Графики функции $\Phi(\sigma, t)$.

разных моментов времени t . Видно, что для любого времени t существует только одно значение σ , при котором функция $\Phi(\sigma, t)$ имеет максимум. Это свойство функции $\Phi(\sigma, t)$ будет использовано при решении обратной задачи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЖИМАЕМОСТИ И ВЯЗКОСТИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

В работах по моделированию грязевулканической деятельности расчету вязкости и сжимаемости газообразных флюидов не уделяется достаточного внимания. Газ, как правило, считается идеальным, а его параметры в явном виде не зависят от внешних условий.

Так как в термодинамических условиях земной коры газ не может считаться идеальным, то в настоящей работе используется уравнение состояния реального газа

$$\rho_g = \frac{\rho_0 T_0}{p_0 z T} p_g,$$

где коэффициент сжимаемости z учитывает неидеальность газа. Данный коэффициент зависит от температуры T и давления p_g газа. Температура и давление газа изменяются во времени в процессе фильтрации газа и зависят, в частности, от коэффициента сжимаемости газа. В силу такой взаимозависимости рассматриваемых величин точный расчет значений температуры и давления газа в каждой точке подводящего канала в любой момент времени представляет собой сложную задачу. Однако можно приближенно оценить значение z , а затем использовать эту оценку при расчетах. Для этого будем считать, что температура и давление газа в подводящем канале соответствуют термодинамическим условиям окружающей геосреды. Температура и давление в земной коре на глубине h зависят от величины среднего геотермического градиента и средней плотности вышележащих пород, которые далее считаются равными соответственно 0.03 К/м и 2500 кг/м³.

Решение (2) показывает, что при больших временах коэффициент сжимаемости, давление и температура газа в подводящем канале связаны зависимостью вида $p_g \cong e^{c/zT}$, где $c = \rho_0 T_0 g H x / p_0$ не зависит от z и T . Разобьем зону фильтрации газа от L до $L - H$ на n участков высотой Δh . Среднее значение величины zT находится по формуле

$$\frac{1}{(zT)_a} = \frac{1}{H} \int_{L-H}^L \frac{1}{zT} dh = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(zT)_i} \Delta h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(zT)_i}, \quad (zT)_a = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(zT)_i} \right)^{-1}.$$

Здесь i — индекс суммирования, обозначающий номер соответствующего участка. Температура T_i , давление p_i и коэффициент сжимаемости z_i газа на участке высотой Δh считаются равными температуре, давлению и коэффициенту сжимаемости газа в середине участка.

Среднее значение вязкости газа определяется как среднее арифметическое величин $(\mu_g)_i$ на каждом выделенном участке подводящего канала: $(\mu_g)_a = \frac{1}{H} \int_{L-H}^L \mu_g dh = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_g)_i$.

При расчете вязкости и сжимаемости газовой смеси необходимо знать ее химический состав. По литературным данным [Шилов и др., 1961; Якубов и др., 1980; Занюков и др., 1982], газообразная фаза продуктов деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана в основном представлена углекислым

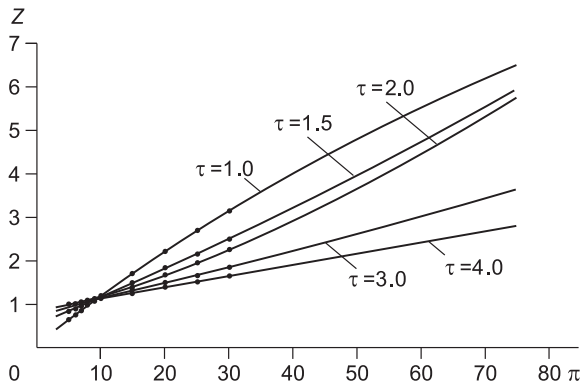


Рис. 4. Регрессионные зависимости коэффициента сжимаемости газа от псевдоприведенного давления.

Пояснения см. в тексте.

газом и метаном, содержание остальных компонентов не превышает нескольких процентов. Содержание CO_2 находится в пределах 40—70 %, содержание CH_4 — в пределах 25—50 %. Исходя из этого, приближенно можно считать, что газ в подводящем канале Южно-Сахалинского вулкана представляет собой бинарную смесь CO_2 и CH_4 .

Расчет вязкости $(\mu_g)_i$ и коэффициента сжимаемости z_i для газовой смеси известного состава при заданных температуре и давлении выполнен на основе рассмотренных в работе [Голубев, Гнездилов, 1971] методик, и по причине его объемности здесь не приводится. В указанной работе для дискретного набора значений температуры и давления газовой смеси приведены данные, необходимые для расчета ее параметров. В нашей работе сделано обобщение расчетной схемы для произвольно заданных значений температуры и давления.

Коэффициент сжимаемости смеси есть линейная комбинация коэффициентов сжимаемости чистых компонентов; каждый из них берется при температуре и давлении смеси: $z_{\text{см}} = z_{\text{CO}_2} N_{\text{CO}_2} + z_{\text{CH}_4} N_{\text{CH}_4}$, где $z_{\text{см}}$, z_{CO_2} и z_{CH_4} — коэффициенты сжимаемости смеси, углекислого газа и метана, N_{CO_2} , N_{CH_4} — содержание компонента в газовой смеси.

Соотношение, определяющее коэффициент сжимаемости z любого газа, имеет вид $z = f(\tau, \pi, z_{\text{кр}})$, где $\tau = T/T_{\text{кр}}$, $\pi = p/p_{\text{кр}}$ — псевдоприведенные температура и давление смеси, T , p — температура и давление смеси, $T_{\text{кр}}$, $p_{\text{кр}}$ — псевдокритические температура и давление смеси [Голубев, Гнездилов, 1971]. В указанной работе вещества разделены на четыре группы по величине $z_{\text{кр}}$, значения z для каждой группы даны как табличные функции τ и π . Общий диапазон изменения τ равен $0.9 \div 15$, а общий диапазон изменения π — $0.01 \div 30$. Соответственно коэффициент z есть дискретный набор значений $z_{j,k}$ для $\tau = \tau_j$ и $\pi = \pi_k$.

Для расчета значений z при τ и π , попадающих в промежуточные интервалы между данными в таблице значениями τ_j и π_k , а также лежащих за пределами табличных значений, по набору точек $z_{j,k}$ выполнялись интерполяция и экстраполяция табличных данных.

При любом τ_j методом наименьших квадратов находилась регрессионная зависимость вида $z_j = a_j \pi^2 + b_j \pi + c_j$, коэффициент детерминации для которой при разных τ_j изменялся от 0.99868 до 0.99995. При уровне значимости 0.001 критическое значение для коэффициента детерминации равно 0.86105, поэтому полученные регрессионные зависимости будут статистически значимыми практически с любой степенью достоверности. Средняя ошибка регрессии для разных τ_j была в пределах от $0.55 \cdot 10^{-2}$ до $1.84 \cdot 10^{-2}$, что составляло 0.5—2.0 % от величины z . На рис. 4 даны графики зависимостей $z(\pi)$ для некоторых τ_j .

Выбор степени полинома обусловлен следующим. Графические зависимости z от τ и π , приводимые в литературе [Силаш, 1980; Маскет, 2003], для разных τ , начиная с $\pi > 2 \div 4$, являются гладкими монотонными функциями. При этом для любых τ увеличение z с ростом π происходит почти линейно.

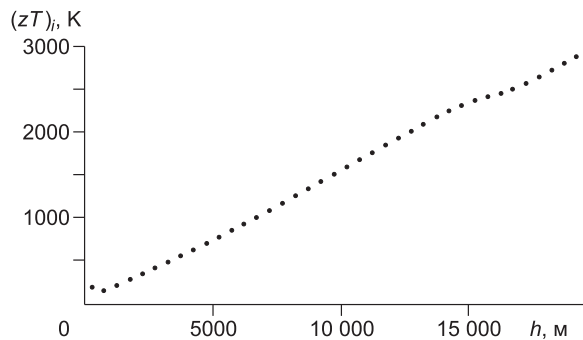


Рис. 5. Зависимость zT от глубины h для Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

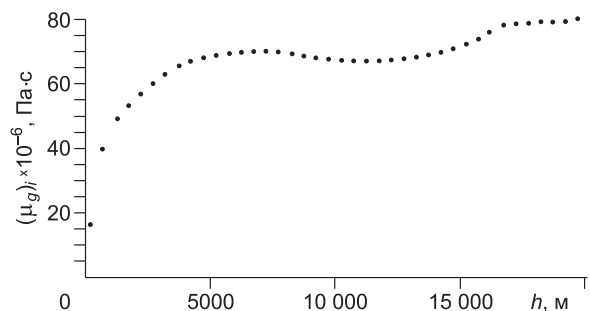


Рис. 6. Зависимость вязкости газа от глубины h для Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

Поэтому набор точек $z_{j=\text{const},k}$ был аппроксимирован полиномом второй степени. Экстраполяция в область больших значений π ($\pi > 30$) полиномами степени выше второй показывает, что они не являются в этой области монотонными функциями.

Если значение τ попадало в интервал между τ_j и τ_{j+1} , то коэффициенты квадратичной регрессии находились линейной аппроксимацией по коэффициентам $a_j, a_{j+1}, b_j, b_{j+1}, c_j, c_{j+1}$.

Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана содержание компонентов газовой смеси примем равным $N_{\text{CO}_2} = 60\%$ и $N_{\text{CH}_4} = 40\%$. Разбив подводящий канал вулкана по глубине на участки высотой $\Delta h = 500$ м, получим зависимости zT и μ_g от глубины h (см. рис. 5, 6). По этим зависимостям, задавая глубину залегания газовой залежи L и размер зоны фильтрации газа H , можно вычислить величины $(zT)_a$ и $(\mu_g)_a$.

Вычисленные значения z_i и $(\mu_g)_i$ газовой смеси могут содержать достаточно большую несистематическую ошибку. Поскольку в работе рассчитываются средние значения параметров газовой смеси, то эта ошибка существенно уменьшится. Поэтому можно считать, что $(zT)_a$ и $(\mu_g)_a$ вычисляются с приемлемой для задачи точностью.

ВЫТЕСНЕНИЕ ГАЗОМ ВОДОГЛИНИСТОЙ БРЕКЧИИ

Модель двухфазной фильтрации [Баренблатт и др., 1984] имеет вид

$$v_b = -k\mu_b^{-1}f_b(s)(p_{b,x} + \rho_b g \sin \alpha), \quad v_g = -k\mu_g^{-1}f_g(s)(p_{g,x} + \rho_g g \sin \alpha), \quad (3)$$

$$ms_t + v_{g,x} = 0, \quad -ms_t + v_{b,x} = 0, \quad p_g - p_b = p_k(s) \equiv p_k^0 \varphi(s). \quad (4)$$

Здесь p_b, μ_b — давление и вязкость брекчии, $v_b, v_g, f_b, f_g, \rho_b, \rho_g$ — соответственно скорости фильтрации, относительные фазовые проницаемости и плотности водоглинистой брекчии и газа, $s_0 \leq s \leq s^0$ — газонасыщенность, s_0, s^0 — остаточные насыщенности, p_k — капиллярное давление, φ — функция Леверетта, $p_k^0 = \gamma \cos \theta \sqrt{m/k}$, γ — коэффициент поверхностного натяжения, θ — краевой угол смачивания. Равенства (3) есть обобщенные законы Дарси, а (4) — уравнения неразрывности фаз и капиллярного скачка давлений на границе раздела фаз.

Начально-краевые условия для системы (3), (4) имеют вид

$$x = L_1 : p_g = p_b = p_A, \quad x = H_1 : v_b = 0, \quad p_g = p_H, \quad t = 0 : s = s_0. \quad (5)$$

Здесь p_A — давление на выходе, в частности, на земной поверхности, p_H — давление на границе $x = H_1$ между газом и водоглинистой брекчией; эти величины считаются известными. Условие на выходе $x = L_1$ означает равенство давлений в фазах на выходе, а на входе $x = H_1$ задан нулевой поток брекчии при известном давлении в газовой фазе.

Система (3), (4) сводится к одному уравнению, которое после перехода к безразмерным переменным $t \rightarrow t/t_f, x \rightarrow (x - H_1)/(L_1 - H_1)$ записывается в виде

$$s_t = (a(s)s_x + b(s)V(t) + d(s)\beta)_x, \quad V(t) = \left(\Delta p - \int_{s_0}^{s(0,t)} b(s) \frac{d\varphi}{ds} ds + \beta \int_0^1 b(s) dx \right) \bigg/ \int_0^1 c(s) dx. \quad (6)$$

Здесь $\mu = \mu_g/\mu_b, c = (f_g + \mu f_b)^{-1}, a = \mu f_b f_g c \frac{d\varphi}{ds}, b = \mu f_b c, d = \mu f_b f_g c, \beta = (\rho_g - \rho_b)(L - H)g/p_k^0, \Delta p = (p_H - p_A - \rho_g g(L - H))/p_k^0$, величины $L_1 - H_1$ и $t_f \equiv m\mu_g(L_1 - H_1)^2/(k p_k^0)$ — характерные длина и время. В силу свойств функций относительных фазовых проницаемостей, $a > 0$ если $s_0 < s < s^0$, и $a(s_0) = a(s^0) = 0$. Поэтому уравнение (6) имеет параболический тип с вырождением при значениях решения s_0 и s^0 .

Начально-краевые условия (5) после преобразований примут следующий вид:

$$x = 0 : a(s)s_x + b(s)V(t) + d(s)\beta = 0, \quad x = 1 : s = s_0, \quad t = 0 : s = s_0. \quad (7)$$

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА — ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ КОРНЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА

Пусть известно время t_e между двумя последовательными извержениями вулкана. Считая, что длительности процессов двухфазной фильтрации и фильтрации газа пропорциональны отношению времен t_f и t_g к их сумме, можно показать, что безразмерное время фильтрации газа к началу вытеснения брекчий равно $t_e / (t_g(L, H) + t_f(L, H)) = t_*(L, H)$. Тогда условие равенства давлений слоя брекчий и подпирющего его газа с учетом (2) дает

$$\frac{\rho_b}{\rho_s} \frac{L-H}{L} = \Phi_0(\sigma(H), 1, t_*(L, H)), \quad (8)$$

где ρ_s — средняя плотность горных пород. В уравнении (8) две неизвестные величины и для однозначного определения L и H необходимо задать дополнительное условие.

Из рис. 3 видно, что существует единственное значение σ , при котором на любой момент времени однозначно определяется давление газа у основания толщи водоглинистой брекчий. Поэтому условие $\max_{\sigma} \Phi(\sigma, t) = \Phi(\sigma_*, t)$ задает зависимость $\sigma_* = \sigma_*(t)$ однозначно. Из определения σ однозначно находится величина $H_*(t)$, и, с учетом (8), глубина $L_*(t) = (1 - \rho \Phi_0(\sigma_*(t), 1, t))^{-1} H_*(t)$, где $\rho = \rho_s / \rho_b$. Отсюда решение обратной задачи по определению глубины залегания корня вулкана и источника газа сводится к решению уравнения $t_*(L_*(t), H_*(t)) = t$. Анализ формулы (2) показывает, что единственное решение этого уравнения существует в широком диапазоне значений входящих в нее параметров.

На рис. 7 дан пример графика, отражающего связь L и H , в частности, с проницаемостью подводящего канала k в зависимости от времени установления равновесия $t = t_*$. Видна однозначная связь между указанными параметрами. Расчетные данные были такие: $\rho_0 = 1.4644 \text{ кг/м}^3$, $\rho_b = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$, $zT = 1100 \text{ К}$, $\mu_g = 69 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\alpha = 60^\circ$, $\gamma \cos \theta = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$, $t_e = 631\,152\,000 \text{ с}$ (20 лет). Номограмма позволяет, в частности, по заданным глубинам L или H найти среднюю проницаемость подводящего канала вулкана.

Расчеты показали, что проницаемость подводящего канала есть основной параметр, которым определяются глубины залегания корня вулкана и источника газа. Глубина залегания источника газа зависит и от его плотности: чем меньше плотность газа, тем больше глубина.

Прямые вычисления показывают, что $\Phi_0(\sigma_*(t), 1, t) \approx e^{-1}$, $t > 0$. Поэтому в силу формулы (8) для всех $t > 0$ справедливо, что

$$\frac{L-H}{H} \approx \frac{\rho}{e-\rho}. \quad (9)$$

Например, если $\rho_b = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$, то отношение $(L-H)/H \approx 1.05$ и корень вулкана находится примерно в середине подводящего канала.

Отметим, что из определения σ в (1), формул (2) и (9) вытекает, что

$$p_g(1, t) \approx \frac{\rho_s zT}{\rho_0 T_0} \frac{e}{e-\rho} p_0 \Phi(\sigma, t).$$

Поэтому максимум функции $\Phi(\sigma, t)$ для данного момента времени соответствует максимуму давления газа у основания слоя водоглинистой брекчий для этого же момента времени. Этим определяется физический смысл условия максимума функции $\Phi(\sigma, t)$.

Правая часть (9) отрицательная, если $\rho > e$. Тогда равновесия толщи брекчий и газа не существует, грязевой вулкан не образуется, а газ непрерывно истекает в атмосферу.

Можно показать, что $\sigma_*(\infty) = 1$. Согласно (2), $p_g(1, \infty) = p_s e^{-1} = \rho_s g L e^{-1}$. Поэтому если сила сопротивления или давление p_c , оказываемое толщей брекчий, будет больше $\rho_s g L e^{-1}$, то равновесие между брекчийей и газом будет невозможным и грязевой вулкан окажется погребенным. Отсюда вытекает, что $L \leq e p_c / (\rho_s g)$ и максимальная глубина залегания источника газа для погребенного грязевого вулкана равна $L_{\max} = e p_c / (\rho_s g)$.

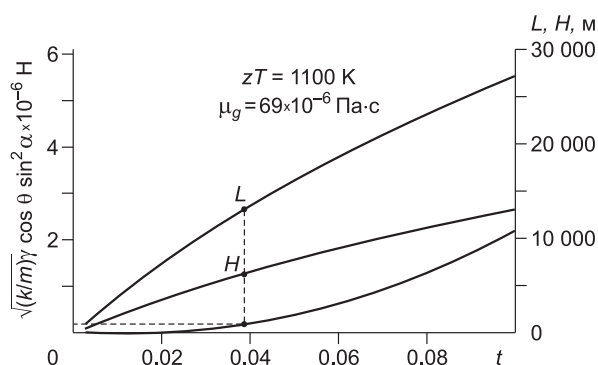


Рис. 7. Номограмма, отражающая связь L и H с проницаемостью подводящего канала.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫТЕСНЕНИЯ БРЕКЧИИ ГАЗОМ

Для исследования процесса вытеснения брекчии газом задача (6), (7) решалась методом конечных разностей. Алгоритм численного расчета этой задачи предложен в работе [Антонцев и др., 1989] и потому здесь излагается кратко.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (6) имела вид

$$\frac{s_i^{j+1} - s_i^j}{\tau} = \frac{\Psi_{i+1/2}^{j+1} - \Psi_{i-1/2}^{j+1}}{h},$$

$$i = 1, \dots, n, \quad j = 0, \dots, \quad \Psi_{i+1/2}^{j+1} = a_{i+1/2}^{j+1} \frac{s_{i+1}^{j+1} - s_i^{j+1}}{h} + V^{j+1} b_{i+1/2}^{j+1} + \beta d_{i+1/2}^{j+1}.$$

Здесь τ и h — постоянные шаги по времени и пространству, n — число узлов сетки, $s_i^j = s(ih, j\tau)$,

$$a_i^j = a(s_i^j), \quad b_i^j = b(s_i^j), \quad d_i^j = d(s_i^j), \quad a_{i+1/2}^{j+1} = \frac{a_{i+1}^{j+1} + a_i^{j+1}}{2}, \quad b_{i+1/2}^{j+1} = b\left(\frac{s_{i+1}^{j+1} + s_i^{j+1}}{2}\right), \quad d_{i+1/2}^{j+1} = d\left(\frac{s_{i+1}^{j+1} + s_i^{j+1}}{2}\right).$$

Интегралы в функционале V вычислялись по формуле трапеций. Аппроксимация начально-краевых условий (7) следующая:

$$x = 0: \quad \Psi_{n-1/2}^{j+1} = -\frac{h}{\tau}(s_n^{j+1} - s_n^j), \quad x = 1: \quad s_0^{j+1} = 0, \quad t = 0: \quad s_i^0 = 0, \quad i = 0, \dots, n.$$

Порядок аппроксимации разностной схемы $O(\tau + h^2)$. Расчеты проводились методами простой итерации и трехточечной прогонки. Шаг по времени τ выбирался из условия сходимости итераций с заданной точностью для данного числа итераций. Число узлов сетки было равно $n = 200$, что соответствовало шагу $h = 23.67$ м. Параметры расчета, в дополнение к приведенным выше, были следующими:

$$\mu_b = 82 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad \mu_g = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad k = 0.217 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2, \quad p_H - p_A = 162.2 \text{ МПа},$$

$$L = 7890 \text{ м}, \quad H = 3790 \text{ м}, \quad \rho_g = 642 \text{ кг/м}^3, \quad m = 0.1, \quad s_0 = 0.1, \quad s^0 = 0.9.$$

Вязкость брекчии определялась по заданному времени вытеснения до прорыва газа, которое считалось равным среднему периоду времени между двумя последовательными извержениями вулкана. Функции Леверетта и относительных фазовых проницаемостей имели вид

$$\varphi(s) = \left(\frac{s-0.1}{0.9-s}\right)^3, \quad f_b(s) = \left(\frac{0.9-s}{0.8}\right)^3, \quad f_g(s) = \left(\frac{s-0.1}{0.8}\right)^3.$$

Проницаемость подводящего канала вулкана рассчитана по формуле [Справочное руководство..., 1979] $k = 85\,000 b^2 m \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ при раскрытии трещины $b = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Давление p_H находилось из стационарного решения задачи (1) при $zT = 836 \text{ К}$. Средняя плотность газа равна

$$\rho_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_g^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_0 T_0}{p_0(zT)_i} p_i = \frac{L-H}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_0 T_0 g i}{p_0(zT)_i} \rho_s =$$

$$= \rho_s \frac{\rho_0 T_0 g (L-H)}{p_0 n^2} \sum_{i=1}^n \frac{i}{(zT)_i},$$

где $n = 8$ — число разбиений отрезка $L - H$, а $(zT)_i$ находились по графику на рис. 5.

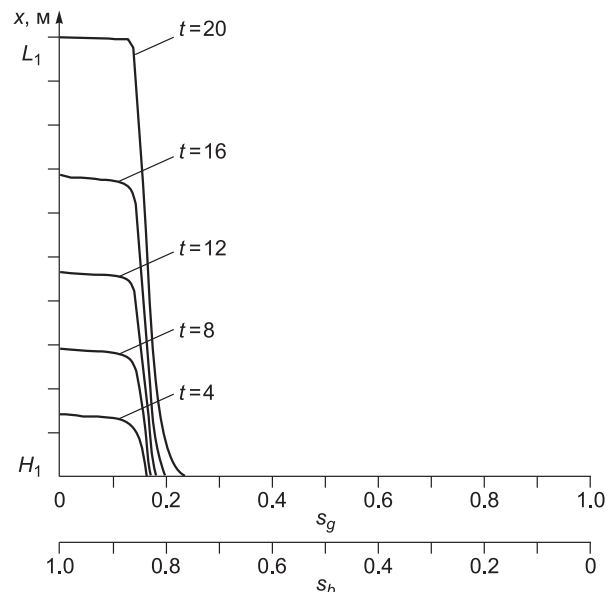


Рис. 8. Распределение газонасыщенности при вытеснении газом брекчии (время указано в годах).

На рис. 8 дан пример расчета задачи вытеснения брекчии газом на различные моменты времени, при этом значения s_g нормированы по формуле $s_g \rightarrow (s_g - s_0)/(s^0 - s_0)$, $s_b = 1 - s_g$. Видно, что после прорыва газа в подводящем канале остается значительный объем брекчии. Поэтому после извержения вулкана и сброса давления газа та часть подводящего канала вулкана, которую ранее занимал вышедший из канала газ, заполняется брекчией под действием сил гравитации. Кроме того, возможен боковой приток из осадочных водосодержащих глинистых пластов. Это приводит к закупорке подводящего канала и подготовке нового извержения. Расчеты показали, что отношение вязкостей брекчии и газа, а также перепад давления $p_H - p_A$ будут основными параметрами, влияющими на длительность и полноту вытеснения брекчии. Например, увеличение вязкости брекчии снижает полноту ее вытеснения и повышает длительность этого процесса, а рост $p_H - p_A$ снижает продолжительность вытеснения.

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ТЕЛА ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА ПРИ НАЛИЧИИ ГРИФОННОГО ПОЛЯ

Вытесняемая газом водоглинистая брекчия заполняет собой окружающие подводящий канал пластовые структуры. Поэтому при вытеснении газом брекчии из подводящего канала в теле вулкана — при поверхностной зоне подводящего канала — под действием давления брекчии по механизму гидроразрыва образуется система трещин, заполняемая брекчией. Из части этих трещин, имеющих выход на поверхность, образуется система грифонов.

На рис. 9 дана схема расположения групп грифонов для Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Грифонные группы вулкана образуют полосу, ориентированную вдоль Центрально-Сахалинского разлома (взброснадвига). Трещины, образующие подводящие каналы для грифонов, могут быть вертикальными или наклонными.

Пусть проекция точки C вниз соответствует области выхода подводящего канала к основанию тела вулкана на глубине Z . От этой области по телу вулкана расходятся трещины (рис. 10).

Если выразить давление p_m^i (см. рис. 10) как среднее, $p_m^i = \cos \gamma_i p_Z + (1 - \cos \gamma_i) p_l$, то с учетом равенств $p_l = \nu p_Z / (1 - \nu)$ [Николаевский и др., 1970], $\cos \gamma_i = l_i / \sqrt{Z^2 + l_i^2}$, $p_Z = \rho_Z g Z$, получим, что давление гидроразрыва для подводящего канала одной группы грифонов равно

$$p_m^i = \left(\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \frac{l_i}{\sqrt{Z^2 + l_i^2}} + \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \rho_Z g Z.$$

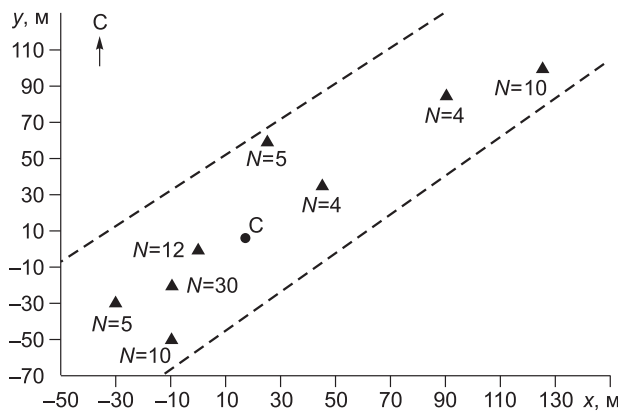


Рис. 9. Схематическая карта грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

N — число грифонов в каждой группе, C — «центр масс» системы грифонов.

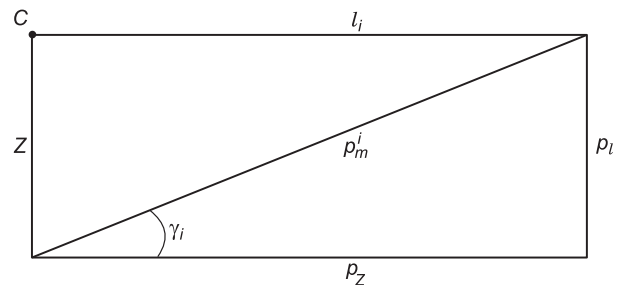


Рис. 10. Геометрия трещины гидроразрыва в теле вулкана.

l_i — расстояние от точки C до i -й группы грифонов, γ_i — угол падения подводящего канала группы грифонов, p_m^i — давление на крыльях подводящего канала группы грифонов, $i = 1, \dots, N$, ν , ρ_Z — соответственно коэффициент Пуассона и плотность тела вулкана, p_Z — литостатическое давление пород тела вулкана на глубине Z , p_l — боковое горное давление, p_v — давление под телом вулкана.

Тогда для n грифонов суммарное давление гидроразрыва будет равно

$$\left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{Z^2 + l_i^2}} + \frac{n\nu}{1-\nu} \right) \rho_Z g Z = p_V.$$

Отсюда следует уравнение для расчета средней глубины залегания тела вулкана Z :

$$\frac{n\nu}{1-\nu} - \frac{p_V}{\rho_Z g Z} + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{Z^2 + l_i^2}} = 0. \quad (10)$$

Если глубина Z является малой по отношению к глубине $L - H$ слоя брекчии, то максимально возможное давление p_V можно найти из стационарного решения задачи (1) для интервала (H, L) : $p_V = p_H \exp(-\rho_0 T_0 g (L - H) / (p_0 z T)) = 91.0$ МПа, $zT = 274$ К.

Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана число групп грифонов $n = 8$, а длины $l_1 \approx 60$, $l_2 \approx 63$, $l_3 \approx 38$, $l_4 \approx 18$, $l_5 \approx 40$, $l_6 \approx 107$, $l_7 \approx 143$, $l_8 \approx 54$ м. Пусть $\nu = 0.35$. Расчет по формуле (10) дает значенные глубины $Z = 810$ м. Если подводющие каналы грифонов вертикальные, то $Z = 861$ м. Если каждый грифон из каждой группы грифонов рассматривать отдельно, то для Южно-Сахалинского грязевого вулкана $n = 80$, а $Z = 80$ м; если каналы вертикальные, то $Z = 86$ м. Поэтому мощность тела вулкана меняется в пределах от 80 до 861 м в зависимости от наклонов подводющих каналов и количества грифонов. С ростом числа грифонов n или снижением давления p_V мощность Z уменьшается.

ИЗВЕРЖЕНИЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА

Пусть газ достиг основания тела вулкана на глубине Z и его давление выросло до величины p_V . Начиная с этого момента, в теле вулкана происходят многочисленные разрывы сплошности среды, которые будем рассматривать как множество тонких субвертикальных каналов различных радиусов. Рассмотрим в квазистационарном приближении процесс вытеснения газом брекчии по вертикальной трубке радиусом R . Движение брекчии по трубке считается осредненным течением Пуазейля [Кочин и др., 1963], а давление в газе распределенным согласно стационарному решению задачи (1). Поскольку граница $l(t)$ между газом и брекчией является контактным разрывом, то

$$\frac{dl}{dt} = \frac{R^2}{8\mu_b} \left(\frac{p_b(l) - p_0}{Z - l} - \rho_b g \right), \quad l(0) = 0, \quad p_b(l) = p_g(l), \quad p_g(l) = p_V e^{-\sigma_0 l}, \quad \sigma_0 = \frac{\rho_0 T_0 g}{p_0 z T}.$$

Вводя безразмерные переменные $t' = t(p_0 R^2) / (8\mu_b Z^2)$, $l' = l/Z$, $p'_V = p_V/p_0$, $\sigma_1 = \sigma_0 Z$ и убирая штрихи, из последних равенств получим задачу для определения l :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{p_V e^{-\sigma_1 l} - 1}{1 - l} - \frac{\rho_b g Z}{p_0}, \quad l(0) = 0.$$

Поскольку $p_V \gg \max(1, \rho_b g Z / p_0)$, то задачу для $l(t)$ можно упростить:

$$\frac{dl}{dt} = p_V \frac{e^{-\sigma_1 l}}{1 - l}, \quad l(0) = 0.$$

Решение этой задачи имеет вид $(1 + \sigma_1 - \sigma_1 l) e^{\sigma_1 l} = 1 + \sigma_1 + p_V \sigma_1^2 t$. Тогда время подхода фронта вытеснения брекчии газом к земной поверхности равно $t_d = (e^{\sigma_1} - 1 - \sigma_1) / (p_V \sigma_1^2)$. Например, если $Z = 200$ м, $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $zT = 442$ К, $p_V = 91.0$ МПа (остальные параметры даны выше), то время вытеснения брекчии из тела вулкана равно 5.8 с.

После прорыва газа из тела вулкана происходит истечение газа в атмосферу. Так как давление газа гораздо выше атмосферного, то можно считать, что происходит истечение газа в вакуум. Если даны скорость звука в газе c_0 , удельные теплоемкости газа при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v ,

то скорости истечения газа из тела вулкана $W = 2c_0 / (c_p/c_v + 1)$, а скорость движения границы между вакуумом и выходящим газом $U = 2c_0 / (c_p/c_v - 1)$ [Овсянников, 1981]. Удельные теплоемкости газовой смеси рассчитаны по данным из работы [Варгафтик, 1972] и равны $c_p = 1893.9$ Дж/(кг·К), $c_v = 1640.7$ Дж/(кг·К). При $p_V = 91.0$ МПа плотность газа $\rho_g = 813$ кг/м³ скорость звука $c_0 = \sqrt{c_p p_V / c_v \rho_g} = 360$ м/с, скорость $W = 334$ м/с, а скорость $U = 4660$ м/с.

Следует отметить, что данные оценки получены для максимально возможного давления под телом вулкана p_V . Однако, исходя из имеющихся натуральных данных о деятельности грязевых вулканов, эти оценки можно считать вполне приемлемыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показано, что:

— процессы подготовки и извержения грязевых вулканов необходимо описывать моделями для неустановившихся течений геофлюидов;

— условие максимума давления газа у основания водоглинистой толщи на данный момент времени равносильно единственности решения обратной задачи по определению глубин залегания корня и источника газа для грязевого вулкана;

— существует практически постоянное отношение высот слоев газа и водоглинистой брекчии на момент установления равновесия между ними;

— основным параметром, определяющим глубины залегания корня грязевого вулкана и источника газа является проницаемость подводющего канала;

— отношение вязкостей водоглинистой брекчии и газа задает основной интервал времени между двумя последовательными извержениями грязевого вулкана;

— имеется существенно неполное вытеснение газом водоглинистой брекчии из подводющего канала на момент извержения грязевого вулкана;

— при известном числе действующих на поле вулкана грифонов и/или групп грифонов можно оценить интервал, в котором заключена мощность тела грязевого вулкана;

— процесс вытеснения брекчии из тела вулкана при извержении является относительно быстропротекающим, а скорость истечения газа имеет порядок скорости звука в воздухе.

Исследования выполнены при частичной поддержке ДВО РАН (грант № 09-III-A-08-439).

ЛИТЕРАТУРА

Алиев Ад.А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2006, № 3, с. 35—51.

Антонцев С.Н., Доманский А.В., Пеньковский В.И. Фильтрация в прискважинной зоне пласта и проблемы интенсификации притока. Новосибирск, ИГиЛ СО АН СССР, 1989, 191 с.

Астахов А.С., Сергеев К.Ф., Мельников О.А., Присяжнюк А.В., Шакиров Р.Б., Бровко П.Ф., Киселев В.И. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле-августе 2001 г.) // Докл. РАН, 2002, т. 386, № 2, с. 223—228.

Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., Недра, 1984, 208 с.

Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972, 720 с.

Войтов Г.И. О химических и изотопно-углеродных нестабильностях грифонных газов грязевых вулканов (на примере Южно-Каспийской и Таманской грязевулканических провинций) // Геохимия, 2001, № 4, с. 422—433.

Гемп Г.Д., Лагунова И.А., Несмелова З.Н. Особенности формирования газового состава грязевых вулканов // Геохимия, 1979, № 12, с. 1859—1867.

Голубев И.Ф., Гнездилов Н.Е. Вязкость газовых смесей. М., Изд-во стандартов, 1971, 330 с.

Горкун В.Н., Сирый И.М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика, 1967 (2), с. 30—42.

Ершов В.В., Левин Б.В., Мельников О.А., Доманский А.В. Проявления Невельского и Горнозаводского землетрясений 2006—2007 гг. в динамике грифонной деятельности Южно-Сахалинского газодолитокластитового (грязевого) вулкана // Докл. РАН, 2008, т. 423, № 4, с. 533—537.

- Занюков В.Н., Мельников О.А., Федорченко В.И.** Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геология и геофизика, 1982 (2), с. 127—130.
- Иванов В.В., Гулиев И.С.** Массообмен, углеводородообразование и фазовые переходы в осадочных бассейнах. Баку, Изд-во Нафта-Пресс, 2002, 107 с.
- Каракин А.В., Каракин С.А.** Флюидодинамическая модель грязевого вулканизма внутриконтинентального типа // Докл. РАН, 2000, т. 374, № 5, с. 684—687.
- Каракин А.В., Каракин С.А., Камбарова Г.Н.** Геолого-геофизический анализ регионов грязевого вулканизма // Физика Земли, 2001, № 8, с. 76—85.
- Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.** Теоретическая гидромеханика, т. 2. М., Физматгиз, 1963, 728 с.
- Кузнецов О.Л., Каракин А.В.** Концепция трещиноватой структуры и флюидного режима в верхней коре // Геоинформатика, 2002, № 3, с. 3—19.
- Лагунова И.А.** О генезисе CO₂ в газах грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия, 1974, № 11, с. 1711—1716.
- Лейбензон Л.С.** Движение жидкостей и газов в пористой среде. М., Л., Гостехиздат, 1947, 44 с.
- Маскет М.** Физические основы технологии добычи нефти. М., Изд-во «Регулярная и хаотическая динамика», 2003, 606 с.
- Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се.** О динамике грифонной деятельности газовой-долитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология, 2008, т. 27, № 5, с. 25—41.
- Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.** Механика насыщенных пористых сред. М., Недра, 1970, 336 с.
- Овсянников Л.В.** Лекции по основам газовой динамики. М., Наука, 1981, 336 с.
- Осика Д.Г.** Флюидный режим сейсмически активных областей. М., Наука, 1981, 204 с.
- Силаш А.П.** Добыча и транспорт нефти и газа, ч. 2. М., Недра, 1980, 264 с.
- Собисевич А.Л., Лаверова Н.И., Собисевич Л.Е., Микадзе Э.И., Овсяченко А.Н., Башорин В.Н., Пронин А.П., Гурбанов А.Г., Шевченко А.В.** Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. М., ИФЗ РАН, 2005, 225 с.
- Справочное** руководство гидрогеолога, т. 1 / Ред. В.М. Максимова. Л., Недра, 1979, 512 с.
- Холодов В.Н.** Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщение 1. Грязевулканические провинции и морфология грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые, 2002, № 3, с. 227—241.
- Шилов В.Н., Захарова М.А., Ильев А.Я., Подзоров А.В.** Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана весной 1959 г. // Труды СахКНИИ СО АН СССР, Южно-Сахалинск, 1961, вып. 10, с. 83—99.
- Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А., Бабазаде А.Д., Велиев М.М., Гаджиев Я.А., Гусейнзаде И.Г., Кабулова А.Я., Кастрюлин Н.С., Матанов Ф.А., Мустафаев М.Г., Рахманов Р.Р., Сафарова О.Б., Сеидов А.Г.** Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку, Изд-во «Элм», 1980, 167 с.
- Martinelli G., Dadomo A.** Mud volcano monitoring and seismic events // Mud volcanoes, geodynamics and seismicity // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Baku, Azerbaijan, 20—22 May, 2003. Dordrecht, Springer, 2005, p. 187—199.
- Murton V.J., Biggs J.** Numerical modelling of mud volcanoes and their flows using constraints from the Gulf of Cadiz // Marine Geol., 2003, v. 195, p. 223—236.
- Yang T.F., Fu C.-C., Walia V., Chen C.-H., Chyi L.L., Liu T.-K., Song S.-R., Lee M., Lin C.-W., Lin C.-C.** Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: multi-parameter automatic gas monitoring results // Pure Appl. Geoph., 2006, v. 163, p. 693—709.