

<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0078>

FLUID DYNAMICS PROCESSES AT THE CENTRAL SAKHALIN FAULT (BASED ON OBSERVATIONS OF THE YUZHNO-SAKHALINSK MUD VOLCANO)

V. V. Ershov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract: The Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano is located in the southern part of the Sakhalin Island within the area of the Central Sakhalin fault, one of the largest disjunctive dislocations of the island. The volcano was monitored during field seasons in the period from 2005 to 2007, and data on flow rates, chemical and isotope compositions of gases, temperature and chemical composition of water-mud mixture in the volcano's blowouts were collected and analysed. During the observation period, seismic activity in the region under study was significantly variable in time and space. The monitoring results revealed «traces» of two earthquakes in the blowout activity of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano – the Gornazavodsk earthquake, that took place on 17 (18) August 2006, and the Nevelsk earthquake of 2 August 2007. Based on results of our analyses of the field data and mathematical simulation data, it is possible to conclude that an additional inflow of «deep geofluids» could not have been a major trigger of the activity of the volcano after the earthquakes. In our opinion, all the observed anomalies may result from «water – rock – gas» interactions in the top part of the mud volcano's feeder channel. A combination of water and gas flows in the volcano's channel and silica-alumina rocks comprises a specific geochemical system that is sensitive to external (seismic) impacts. Therefore, comprehensive consideration of physical and chemical processes within fluid-dynamic systems is required for assurance of correct interpretation of empirical data.

Key words: mud volcanoes, geofluids, material composition, dynamics, Sakhalin Island, seismicity, monitoring, mathematical modelling.

Recommended by E.V. Sklyarov 2 November 2012

Citation: Ershov V.V. 2012. Fluid dynamics processes at the Central Sakhalin fault (based on observations of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano). *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (4), 345–360. doi:10.5800/GT-2012-3-4-0078.

ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО- САХАЛИНСКОГО РАЗЛОМА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЮЖНО-САХАЛИНСКОМ ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНЕ)

В. В. Ершов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Аннотация: Проанализированы результаты мониторинга дебита, химического и изотопного состава свободных газов, температуры и элементного состава водогрязевой смеси в грифонах на Южно-Сахалинском грязевом вулкане. Данный вулкан приурочен к Центрально-Сахалинскому взбросо-надвику – одной из самых крупных дизъюнктивных дислокаций о. Сахалин. Наблюдения выполнены в полевые сезоны 2005–2007 гг., которые характеризовались раз-

личной сейсмической активностью южной части о. Сахалин. В результате нами установлены проявления Горнозаводского землетрясения 17 (18) августа 2006 г. и Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Данные натурных наблюдений, а также математического моделирования свидетельствуют о том, что дополнительный подток глубинных геофлюидов не мог быть основной причиной активизации вулкана после землетрясений. По нашему мнению, весь комплекс наблюдаемых аномалий объясняется взаимодействием «вода–порода–газ» в верхней части подводящего канала грязевого вулкана. Потоки воды и газа в канале вулкана, а также вмещающие алюмосиликатные породы образуют специфическую геохимическую систему, которая является чувствительной к внешним (сейсмическим) воздействиям. Следовательно, для корректной интерпретации эмпирических данных следует более полно учитывать физико-химические процессы, которые протекают внутри флюидодинамических систем.

Ключевые слова: грязевые вулканы, геофлюиды, вещественный состав, динамика, о. Сахалин, сейсмичность, мониторинг, математическое моделирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм – это довольно распространенное геологическое явление, которое обусловлено процессами дефлюидизации Земли, протекающими в разломных зонах земной коры. Поскольку грязевые вулканы генетически связаны с разломными зонами, предполагается, что деятельность вулканов напрямую зависит от активности контролирующих их разломов. Другими словами, грязевые вулканы могут являться индикатором геодинамики земных недр, реагируя на изменения поля тектонических напряжений в земной коре. Кроме того, интенсивные потоки флюидов в грязевых вулканах оказывают воздействие на реологические свойства пород в зоне разлома, что может влиять на сейсмичность в регионе.

Вопрос о взаимосвязях грязевого вулканизма с региональной сейсмичностью широко обсуждается в отечественных и зарубежных публикациях, в которых высказывается самый широкий спектр мнений. В одних работах утверждается, что в деятельности грязевых вулканов наблюдаются предвестники землетрясений [Astakhov et al., 2002; Shakirov et al., 2004; Aliev, 2006; Yang et al., 2006; Mel'nikov et al., 2008; Chaudhuri et al., 2012]. В других работах утверждается, что после землетрясений происходят извержения грязевых вулканов [Aliev, 2006; Mellors et al., 2007; Bonini, 2009; Manga et al., 2009]. Об определенном влиянии сейсмических событий на деятельность грязевых вулканов говорится и в работах [Voitov, 2001; Martinelli, Dadomo, 2005; Ershov et al., 2008; Kopf et al., 2010]. Можно привести также работы, в которых говорится об отсутствии прямой связи между землетрясениями и извержениями грязевых вулканов [Deville, Guerlais, 2009]. Здесь отмечается, что для того вулкана, который уже готов к извержению, землетрясения могут лишь несколько ускорить наступление этого извержения. Имеются также работы, в которых говорится, что грязевые вулканы сами вызывают землетрясения [Panahi,

Rakhmanov, 1993; Panahi, 2005]. Хотя многие из этих утверждений не противоречат друг другу, тем не менее они и не добавляют ясности по сути рассматриваемого вопроса. Так или иначе, объяснение и аргументация механизма предполагаемой связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью зачастую вызывают затруднения.

Грязевые вулканы – это часть природных флюидодинамических систем, к которым относятся также магматические вулканы, артезианские скважины, залежи нефти и газа, гейзеры и т.п. Существенных принципиальных отличий между этими природными объектами, по нашему мнению, не существует. В них во всех происходит миграция относительно больших объемов флюидов на достаточно большие расстояния за сравнительно небольшие промежутки времени.

В настоящее время считается, что факт реакции флюидов на любые изменения напряженно-деформированного состояния земных недр является аксиомой [Kasyanova, 2003]. Во многих случаях, в том числе и для грязевых вулканов, предлагается следующий общий механизм связи между деятельностью флюидодинамических систем и эндогенными процессами. В силу разных причин (увеличения пластового давления, изменения проницаемости и т.п.) возникает интенсивный подток к дневной поверхности глубинных флюидов, который и вызывает аномалии различных наблюдаемых параметров. Однако флюидодинамические системы являются не только путями миграции глубинных флюидов. В этих системах протекают свои собственные физические процессы, которые необходимо учитывать при интерпретации натурных данных. Отсюда следует, например, что далеко не каждое землетрясение будет проявляться в деятельности этих систем.

Целью данной работы является исследование флюидодинамических процессов, которые протекают в разломных зонах, а также особенностей их связи с региональной сейсмичностью (на примере Южно-Сахалинского грязевого вулкана).

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Центрально-Сахалинский (Тымь-Поронайский) взбросо-надвиг является одной из самых крупных и хорошо изученных дизъюнктивных дислокаций о. Сахалин [Mel'nikov, 1987, 2002]. Он имеет общее меридиональное простирание, протягиваясь практически вдоль всего острова. По этому разлому с запада на восток меловые отложения взброшены или надвинуты на палеоген-неогеновые отложения. Плоскость сместителя наклонена на запад под разными углами – от 20 до 80°. С глубиной предполагается выполаживание наклона поверхности сместителя. С подвижками по Центрально-Сахалинскому и оперяющим его разломам связывается высокая сейсмическая активность на юге о. Сахалин [Safonov, 2008]. По геодезическим данным для о. Сахалин характерны деформации субширотного сжатия, которые повсеместно сопровождаются правосторонними сдвиговыми смещениями по главным разломам [Prytkov, 2008]. Скорость конвергенции блоков на юге острова за инструментальный период наблюдений с 1999 по 2005 г. составляла 5–6 мм/год. Правосдвиговые смещения по субмеридиональным разломам происходят со скоростью 2–3 мм/год.

К Центрально-Сахалинскому разлому приурочены Пугачевские грязевые вулканы, грязевой вулкан Восточный и Южно-Сахалинский грязевой вулкан [Mel'nikov, 1987]. Объемы брекчии, выбрасываемой на земную поверхность при извержениях этих вулканов, составляют от 10^2 до 10^5 м³. Периодичность извержений также различна для разных вулканов и составляет от одного года до нескольких десятков лет [Mel'nikov, Ershov, 2010]. Одним из наиболее крупных и активных вулканов является Южно-Сахалинский грязевой вулкан, который и был основным объектом наших исследований. Достоверно зафиксированы сильные извержения этого вулкана в 1959, 1979 и 2001 гг. Одно относительно слабое извержение произошло в промежутке времени между 1994 и 1996 гг., а другое – в 2011 г.

3. ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В окрестностях Южно-Сахалинского вулкана лабораторией современных движений земной коры Института морской геологии и геофизики ДВО РАН были проведены высокоточные GPS-наблюдения. Здесь была построена локальная геодезическая сеть из пяти пунктов, контролирующая основные разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига (рис. 1). Геодезические измерения были проведены в осенний период в 2005, 2006 и 2008 гг. Для всех периодов наблюдений в качестве опорной станции использовался пункт 01.

В полевые сезоны 2005–2007 гг. на Южно-Сахалинском вулкане нами организованы и проведены дли-

тельные наблюдения за рядом параметров его грифоновой деятельности. При помощи цифрового термометра со стальным щупом измерялись температура водогрязевой смеси в грифонах до глубины 20 см, температура поверхности грязевого поля на глубине около 20 см и температура воздуха. Поскольку температура в грифоне различна по вертикали и горизонтали, водогрязевая смесь перед измерением слегка перемешивалась. Дебит свободных газов, выделявшихся из грифонов, измерялся при помощи воронки, секундомера и сосуда с известной емкостью. Производился отбор проб свежей водогрязевой смеси, изливаемой грифонами. В последнем полевом сезоне отбирались также пробы свободных газов. Элементный состав водогрязевой смеси определялся на атомно-эмиссионном спектрометре «ICAP 6500 Duo» в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН. Здесь же на масс-спектрометре «Finnigan MAT-252» определялся изотопный состав углерода CH₄ и CO₂ в составе свободных газов. Химический состав свободных газов определялся в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН на хроматографе «Кристалл-Люкс 4000М».

Наблюдения с 18 июня по 3 сентября 2005 г. проведены в условиях относительно низкой сейсмической активности в регионе (землетрясения с магнитудой $M > 4.6$ отсутствовали). Наблюдения с 21 июля по 1 октября 2006 г. и с 11 июля по 27 сентября 2007 г. выполнены при сейсмической активизации в регионе. Для Горнозаводского землетрясения 17(18) августа 2006 г. с магнитудой $M_S = 5.6$ эпицентрального расстояние до вулкана составило около 85 км, для Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. с магнитудой $M_W = 6.2$ – около 65 км. Оба землетрясения коровые и считаются связанными с Западно-Сахалинской системой разломов.

Для более глубокого понимания физических процессов, которые лежат в основе грязевого вулканизма, нами выполнено математическое моделирование миграции флюидов в грязевулканических структурах.

Согласно нашим представлениям, деятельность вулкана обусловлена истечением газа из газовой залежи через разлом, который является подводящим каналом вулкана (рис. 2). При математическом описании фильтрации газа на участке от L_1 до L_2 использованы уравнение неразрывности, закон Дарси и уравнение состояния газа [Domanskii, Ershov, 2011]:

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_z v_z)}{\partial x} &= 0, \\ v_z &= -\frac{k}{\mu_z} \left(\frac{\partial p_z}{\partial x} + \rho_z g \sin \alpha \right), \\ \rho_z &= \frac{\rho_0 T_0}{p_0 z T_z} p_z, \end{aligned}$$

где m , k – пористость и проницаемость подводящего канала вулкана, ρ_z , v_z , μ_z , p_z , T_z , z – плотность,

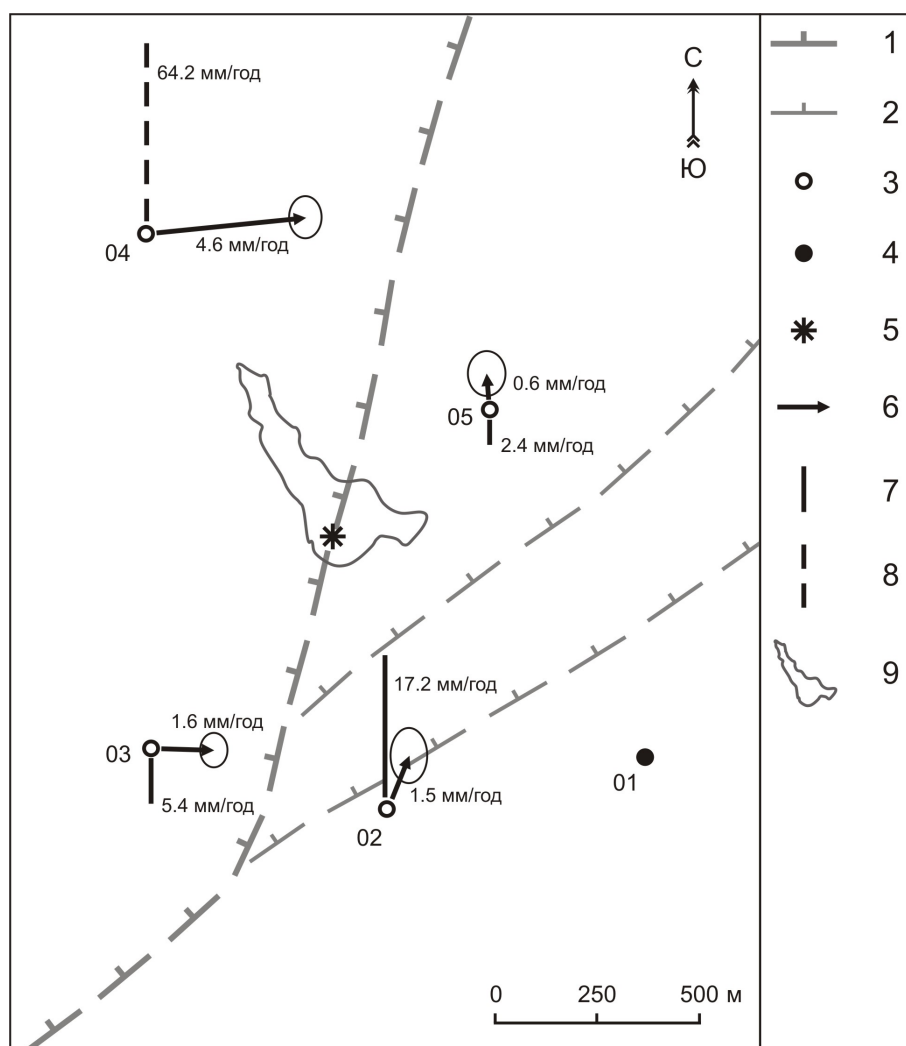


Рис. 1. Схема деформаций земной поверхности в окрестностях Южно-Сахалинского грязевого вулкана по данным GPS-наблюдений за период 2005–2008 гг. 1 – основной сместитель Центрально-Сахалинского разлома; 2 – второстепенные разрывные нарушения; 3 – пункты GPS-наблюдений; 4 – опорный пункт GPS-наблюдений; 5 – Главный грифон вулкана; 6 – скорости горизонтальных деформаций (с 1-σ доверительным эллипсом); 7 – скорости вертикальных деформаций; 8 – немасштабное изображение для скорости вертикальных деформаций; 9 – контур современного грязевого поля вулкана.

Fig. 1. The scheme of surface deformation in the vicinity of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, according to GPS observations in the period from 2005 to 2008. 1 – main plane of the Central Sakhalin fault; 2 – minor faults; 3 – GPS observation sites; 4 – GPS observation station; 5 – main blowout of the volcano; 6 – horizontal strain rates (with 1-σ confidence ellipse); 7 – vertical strain rates; 8 – off-scale image for vertical strain rates; 9 – contour of the current mud field of the volcano.

скорость фильтрации, вязкость, давление, температура и коэффициент сжимаемости газа, g – ускорение свободного падения, α – угол падения разлома, ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях.

Мигрирующий вверх по разлому газ упирается в толщу грязевулканической брекчии, которая перекрывает канал вулкана. С ростом давления газа происходит вытеснение водогрязевой смеси из канала, которое продолжается до момента извержения вулкана. Процесс вытеснения на участке L_2 описывается на основе нестационарных уравнений двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей с учетом капиллярных сил [Domanskii, Ershov, 2011]:

$$v_{z1} = -\frac{k}{\mu_{z1}} f_{z1}(s) \left(\frac{\partial p_{z1}}{\partial x} + \rho_{z1} g \sin \alpha \right),$$

$$v_z = -\frac{k}{\mu_z} f_z(s) \left(\frac{\partial p_z}{\partial x} + \rho_z g \sin \alpha \right),$$

$$-m \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial v_{z1}}{\partial x} = 0, \quad m \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = 0, \quad p_z - p_{z1} = p_k(s),$$

где v_{z1} , μ_{z1} , p_{z1} , ρ_{z1} – скорость фильтрации, вязкость, давление и плотность водогрязевой смеси, f_{z1} , f_z – относительные фазовые проницаемости водогрязевой смеси и газа, s – газонасыщенность, p_k – капиллярное

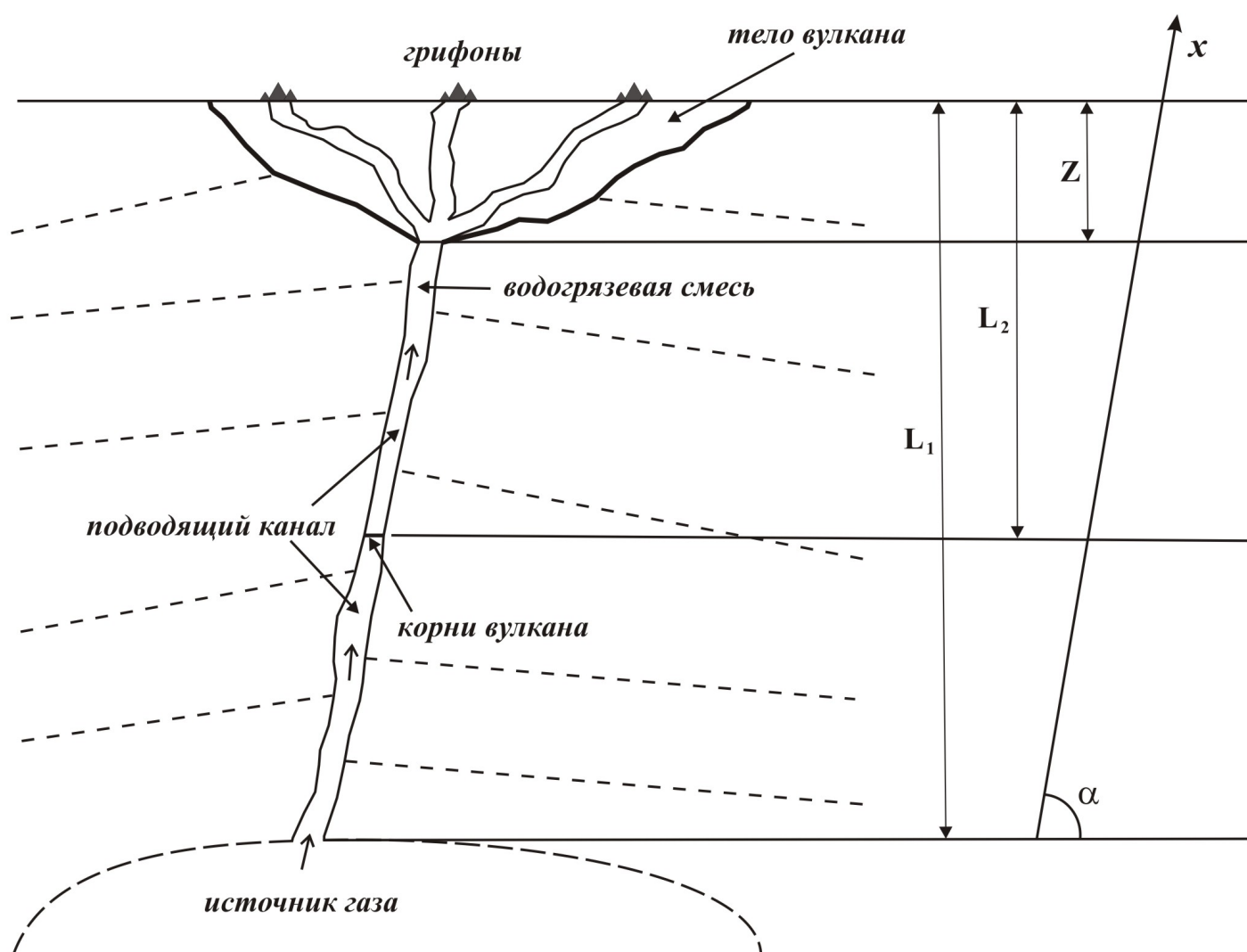


Рис. 2. Схема внутреннего строения грязевого вулкана. L_1 – глубина залегания источника газа; L_2 – глубина залегания корней вулкана; Z – мощность тела вулкана; α – угол падения разломной зоны.

Fig. 2. The scheme of the internal structure of the mud volcano. L_1 – depth of the gas source; L_2 – depth of the volcano's roots; Z – thickness of the volcano's body; α – dip angle of the fault zone.

давление.

При извержении вулкана происходит сброс давления газа, подводящий канал заполняется водогрязевой смесью из окружающих осадочных толщ и начинается подготовка нового извержения. Отметим, что наша схема строения и деятельности вулкана является идеализированной и в действительности возможно, например, наличие нескольких грязевулканических резервуаров.

В промежутках между извержениями вулкана – на стадии грифонной деятельности – происходит медленная разгрузка флюидов через систему грифонных каналов в теле вулкана. Предполагается, что в теле вулкана примерно на глубине залегания пояса постоянных годовых температур существуют относительно небольшие резервуары, которые питают грифоны (рис. 3). Следовательно, температура на нижнем конце ка-

нала будет постоянной. На верхнем конце канала температура смеси равна температуре воздуха T_g , которая претерпевает гармонические колебания с частотой ω_g . Считается, что теплообмен между водогрязевой смесью в канале и окружающей средой происходит в основном на концах канала. Тогда изменения температуры водогрязевой смеси в грифоне описываются одномерным нестационарным уравнением теплопроводности с конвективным слагаемым [Ershov et al., 2010a]:

$$\frac{\partial T_{zn}}{\partial h} = a \frac{\partial^2 T_{zn}}{\partial h^2} - v \frac{\partial T_{zn}}{\partial h},$$

где T_{zn} , a , v – температура, коэффициент теплопроводности и скорость движения водогрязевой смеси.

Предложенные математические модели, их особен-

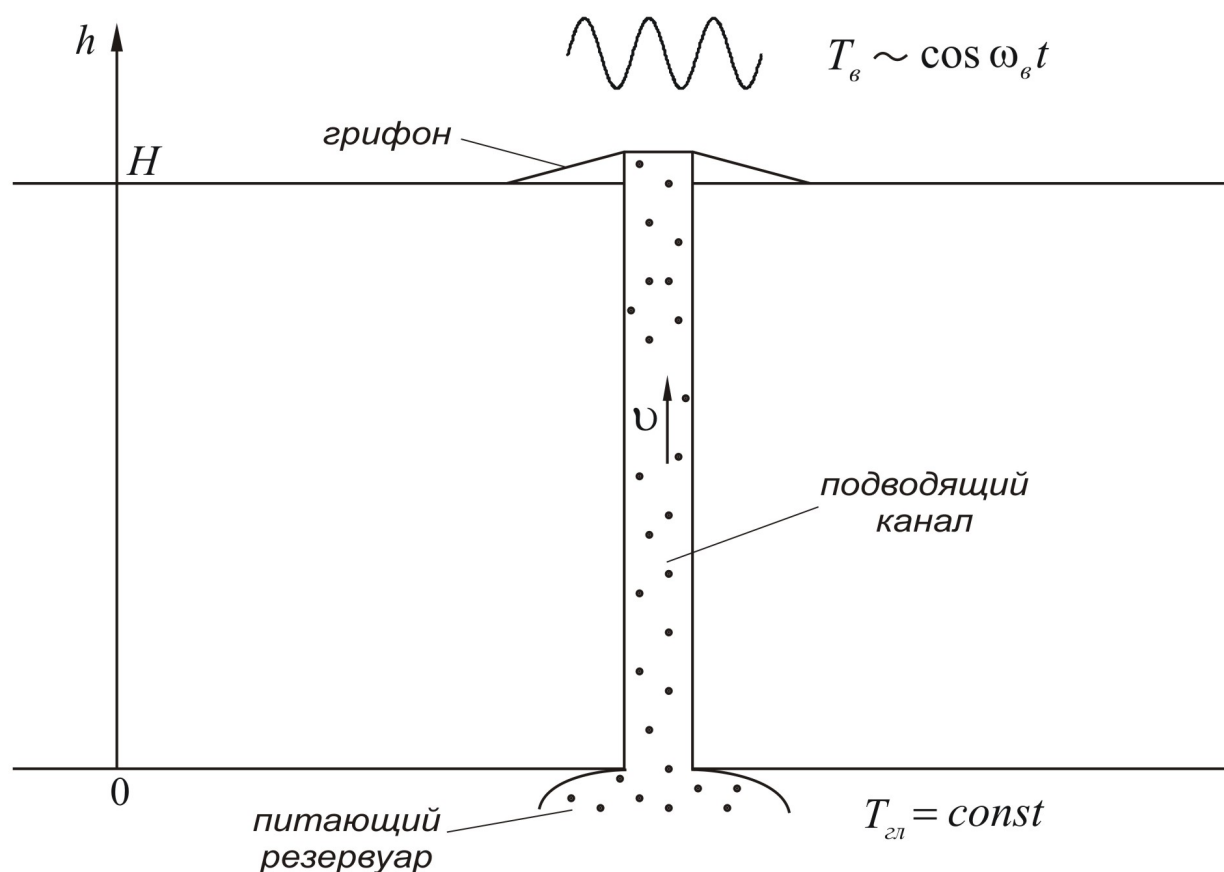


Рис. 3. Схема приповерхностной части грязевого вулкана. H – длина грифонного канала (примерно равна глубине залегания пояса постоянных температур); v – скорость движения водогрязевой смеси в грифонном канале; T_{zl} – температура водогрязевой смеси (на глубине H является константой); T_ϵ – температура воздуха (является периодической функцией времени); ω_ϵ – частота колебаний температуры воздуха; t – время.

Fig. 3. The scheme of the surface part of the mud volcano. H – length of the blowout channel (approximately equal to the depth of constant temperature zone); v – velocity of movements in the water-mud mixture in the blowout channel; T_{zl} – temperature of the water-mud mixture (at depth, H is constant); T_ϵ – air temperature (a periodic function in time); ω_ϵ – air temperature oscillation frequency; t – time.

ности и числовые примеры подробно изложены в работах [Domanskii et al., 2009; Ershov et al., 2010a; Domanskii, Ershov, 2011].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным GPS-наблюдений скорости горизонтальных деформаций земной поверхности в окрестностях Южно-Сахалинского вулкана достаточно небольшие (см. рис. 1). Статистически значимо определены скорости восточного направления для пунктов 03 и 04, расположенных на западном крыле Центрально-Сахалинского разлома. Скорости смещения пунктов 02 и 05, которые расположены на восточном крыле разлома, не превышают двух среднеквадратических ошибок. Следовательно, в окрестностях вулкана происходят деформации сжатия вкрест Центрально-Сахалинского разлома, которые сопровождаются небольшими сдвиговыми деформациями. Полученные данные не-

плохо согласуются с данными о региональных деформациях южной части о. Сахалин, особенности которых указаны выше.

С большей интенсивностью в окрестностях вулкана происходят вертикальные деформации земной поверхности. Севернее вулкана западное крыло Центрально-Сахалинского разлома – пункт 04 – испытывает поднятие со скоростью около 64 мм/год, в то время как пункт 05, расположенный на восточном крыле разлома, относительно стабилен. Южнее вулкана вертикальные движения имеют противоположный характер – западное крыло разлома (пункт 03) опускается относительно восточного (пункт 02) со скоростью около 23 мм/год. По нашему мнению, высокая интенсивность и неоднородный характер вертикальных деформаций в окрестностях вулкана обусловлены деятельностью самого вулкана – интенсивной миграцией флюидов по разлому. Другими словами, Южно-Сахалинский вулкан можно считать активной геологической структурой, которая является подходящим полигоном для

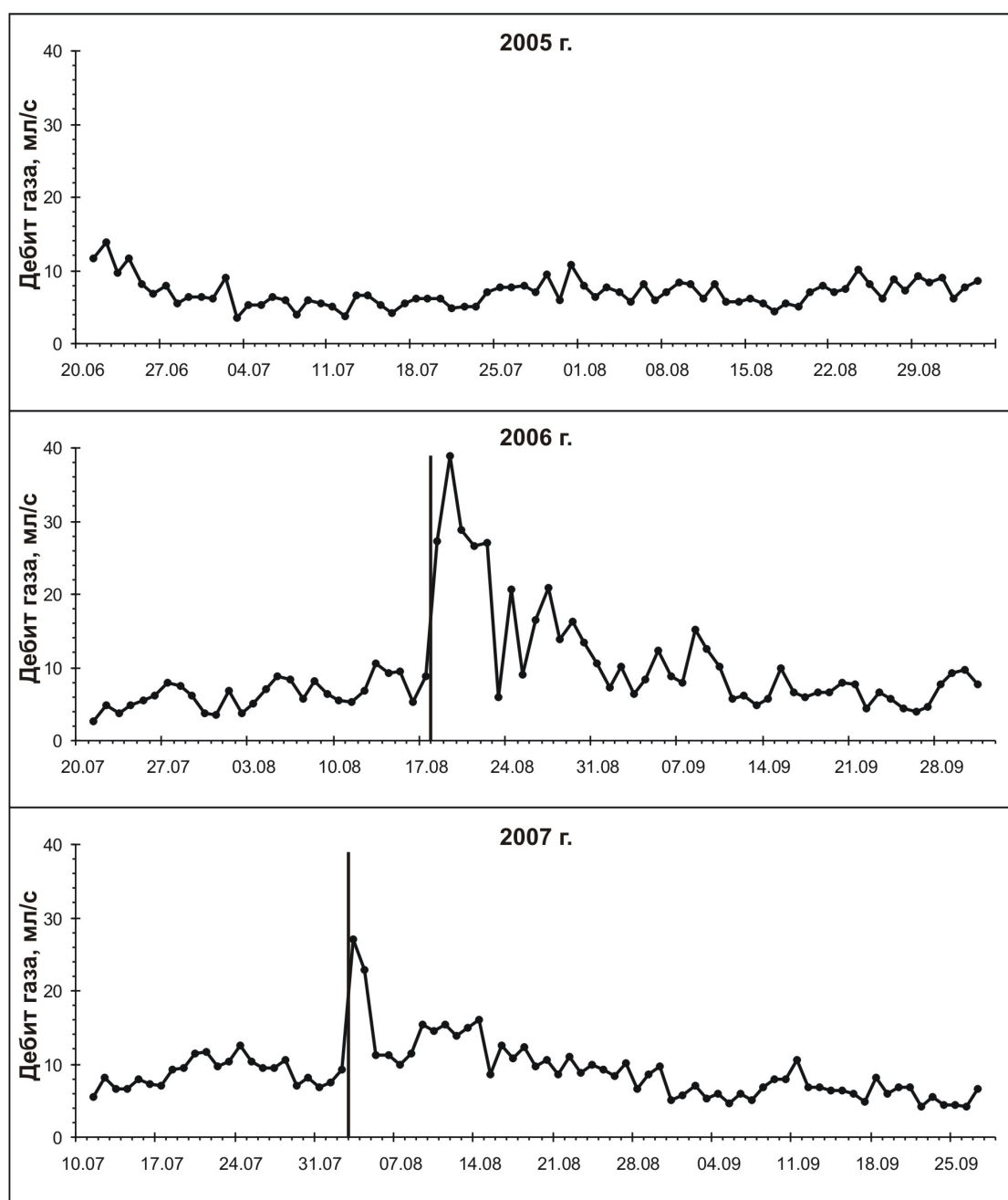


Рис. 4. Изменения во времени дебита газа в грифоне Напарник с указанием даты Горнозаводского и Невельского землетрясений.

Fig. 4. Temporal changes of the gas flow in the Naparnik blowout. The dates of the Gornazavodsk and Nevelsk earthquakes are shown.

изучения связи между флюидодинамическими процессами в земной коре и региональной сейсмичностью.

По результатам мониторинговых наблюдений установлены аномальные изменения в грифонной деятельности вулкана, которые обусловлены сейсмической активизацией южной части о. Сахалин летом 2006 и 2007 гг. После Горнозаводского и Невельского землетрясений в большинстве грифонов произошло увеличение дебита свободных газов [Ershov et al., 2008]. Для некоторых грифонов дебит увеличился в 3–5 раз по сравнению с его средним уровнем до землетрясений

(рис. 4). Отметим, что летом 2005 г., то есть при низкой сейсмической активности в регионе, дебит свободных газов в грифонах вулкана изменялся в относительно небольших пределах.

Температура водогрязевой смеси существенно зависит от температуры воздуха и температуры поверхности грязевого поля. Линейная регрессия на эти два фактора позволяет объяснить до 90 % дисперсии температуры водогрязевой смеси. Значительные отклонения от линейной зависимости рассматривались нами как изменения в деятельности грифона. О таких от-

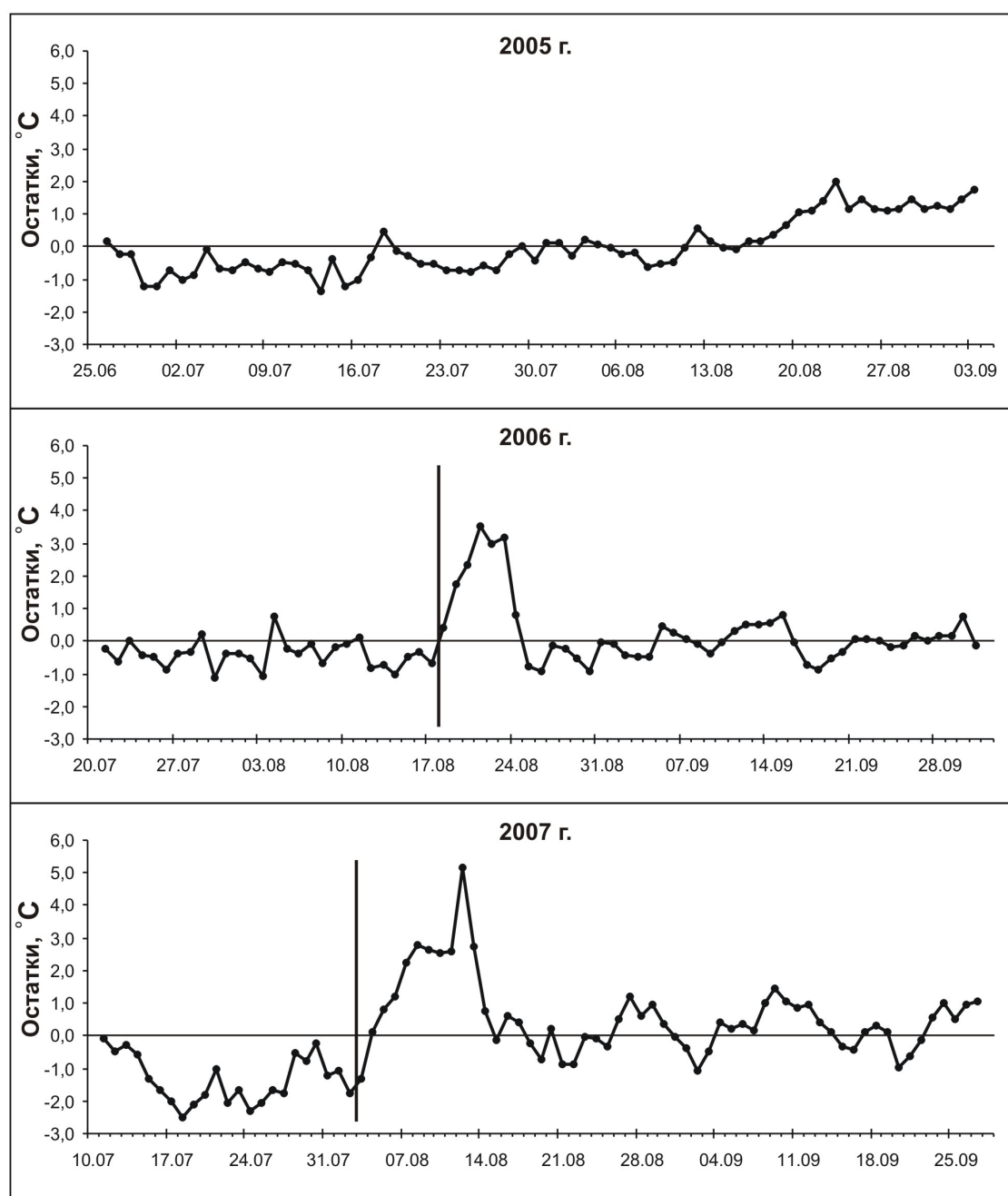


Рис. 5. Изменения во времени отклонений от линейной регрессии для температуры водогрязевой смеси в Главном грифоне с указанием даты Горнозаводского и Невельского землетрясений.

Fig. 5. Temporal changes of deviations from the linear regression for temperature of the water-mud mixture in the Glavny blowout. The dates of the Gornazavodsk and Nevel'sk earthquakes are shown.

клонениях можно судить по остаткам, которые получены после удаления детерминированной составляющей. После указанных землетрясений произошли аномальные изменения температуры водогрязевой смеси в грифонах (рис. 5), причем в одних грифонах имели место положительные аномалии, а в других – отрицательные [Ershov et al., 2008]. В активных грифонах произошло также сильное изменение консистенции водогрязевой смеси – вплоть до вязкой пластичной

массы. Соответственно, для таких грифонов значительно уменьшилось количество изливаемой ими водогрязевой смеси. Отметим, что летом 2005 г. подобных аномалий не наблюдалось.

Установлено также, что после Невельского землетрясения изменился химический состав свободных газов, среди которых преобладают CH_4 и CO_2 [Ershov et al., 2011]. Доля первого в общем составе увеличилась, а доля второго – уменьшилась (рис. 6). После резкого

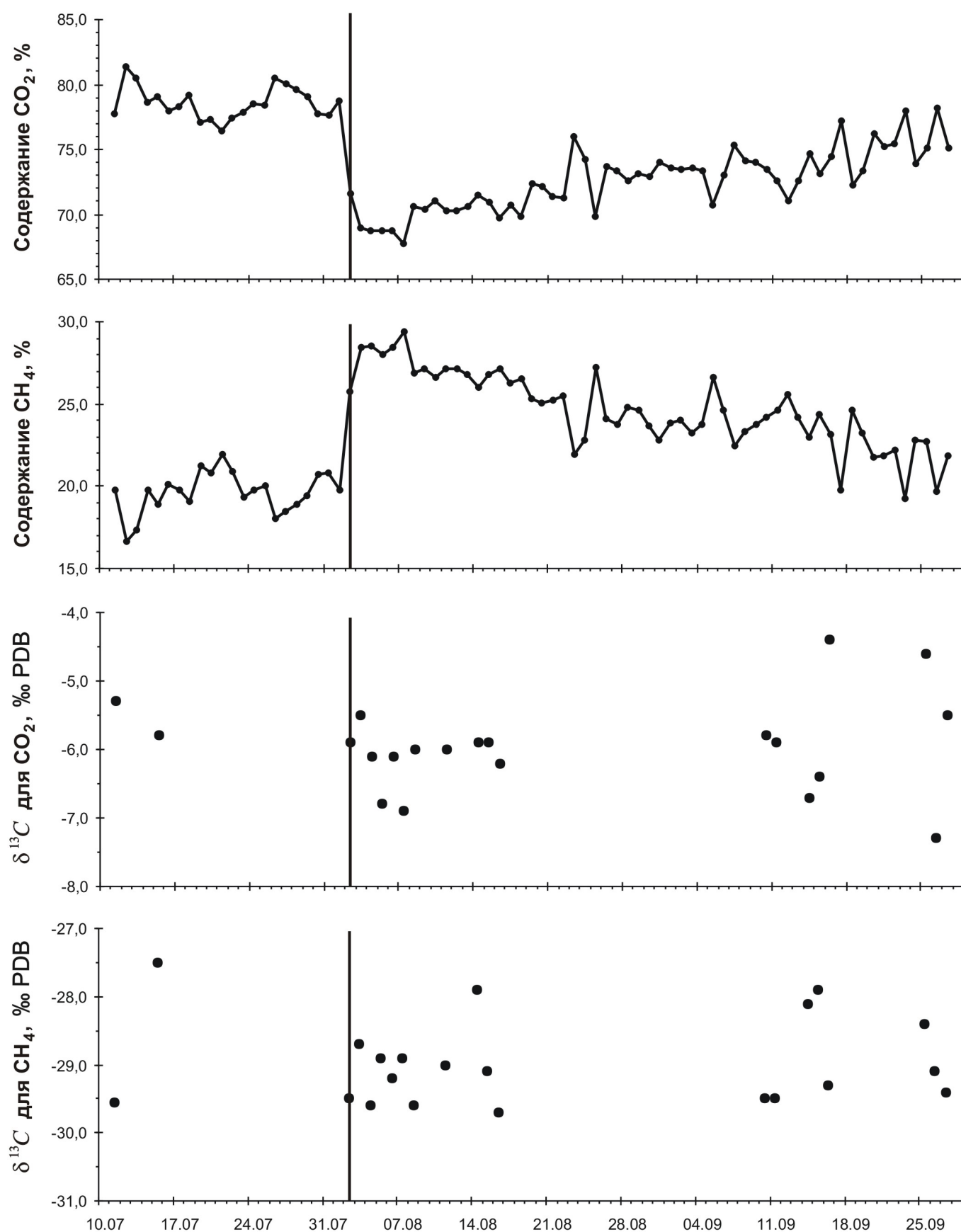


Рис. 6. Изменения во времени химического и изотопного состава свободных газов в грифоне Напарник для периода наблюдений 2007 г. с указанием даты Невельского землетрясения.

Fig. 6. Temporal changes of the chemical and isotopic compositions of gases in the Naparnik blowout in the observation period of 2007. The date of the Nevsk earthquake is shown.

скачка концентраций CH_4 и CO_2 во всех грифонах, по которым проводились наблюдения, отмечалась четко выраженная тенденция к возвращению в состояние с исходным химическим составом. Время релаксации, под которым понимается время, затрачиваемое для возвращения в состояние с начальным химическим составом, составляет несколько месяцев. Изотопный состав углерода CH_4 и CO_2 был практически одинаковым до и после землетрясения (рис. 6). В активных грифонах после землетрясения произошло также изменение элементного состава водогрязевой смеси, в частности увеличилось содержание Ca, Fe, Mg и Mn [Ershov et al., 2010b], хотя нужно отметить, что подобные локальные максимумы этих элементов наблюдались и для других интервалов времени, в которые не происходило каких-либо сильных землетрясений. Все перечисленные аномалии установлены не в одном, а сразу в нескольких грифонах, что повышает достоверность этих аномалий.

Математическая модель фильтрации флюидов в подводящем канале грязевого вулкана позволяет поставить и решить обратную задачу по определению глубины залегания газовой залежи газа и корней вулкана [Domanskii et al., 2009; Domanskii, Ershov, 2011]. Зная примерный интервал времени между двумя последовательными извержениями Южно-Сахалинского вулкана, можно определить, что для этого вулкана источник газа залегает на глубине $L_1 = 7\text{--}10$ км, а корни вулкана – на глубине $L_2 = 3.5\text{--}5.0$ км. Полученные оценки для глубины залегания источника газа хорошо согласуются с данными по изотопии углерода CH_4 и CO_2 в составе грязевулканических газов. Это подтверждает адекватность предложенной математической модели и ее пригодность для различных расчетов по рассматриваемой проблематике.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже сказано выше, грязевые вулканы приурочены к разломным зонам земной коры. Последние обладают повышенной проницаемостью и, соответственно, являются путями миграции глубинных флюидов на поверхность Земли. В связи с этим влияние эндогенных процессов на деятельность грязевых вулканов, а также многих других природных флюидодинамических систем традиционно объясняется перемещением флюидов из нижних горизонтов в верхние с последующим смешиванием флюидов разного состава. С этих позиций можно было бы дать следующее объяснение наблюдаемым аномальным изменениям в деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Пусть после землетрясения происходит интенсивный подток к дневной поверхности глубинных флюидов. Тогда это приведет к увеличению дебита свободных газов в грифонах. Поскольку газы глубинного происхождения могут иметь иной химический состав, может

измениться и соотношение CH_4 и CO_2 в составе свободных газов. Так как глубинные флюиды являются более горячими, их интенсивный вынос на дневную поверхность приведет к увеличению температуры водогрязевой смеси в грифонах. Поскольку глубинные воды могут иметь более высокую минерализацию, при их подъеме в область более низких температур и давлений будет происходить осаждение растворенных элементов. Другими словами, на дневной поверхности будет происходить накопление этих элементов в водогрязевой смеси.

Однако данное объяснение нельзя признать удовлетворительным. После землетрясения в грифонах наблюдались не только положительные температурные аномалии, но и отрицательные. Очевидно, что последние не могут быть вызваны подъемом с глубины горячих флюидов. Стабильность изотопного состава углерода CH_4 и CO_2 в составе свободных газов также не подтверждает гипотезу о дополнительном притоке глубинных флюидов. С этой гипотезой не согласуются и результаты математического моделирования теплопереноса в грифонных каналах [Ershov et al., 2010a]. В рамках предложенной модели указанной гипотезе соответствует повышение температуры на нижнем конце грифонного канала (в питающем резервуаре). Задавая при модельных расчетах такое увеличение, получим, что формирование положительных температурных аномалий происходит со значительным запаздыванием – через 10–30 суток после землетрясения (рис. 7). Это противоречит натурным данным, согласно которым такие аномалии формируются в течение нескольких суток после землетрясения. Все эти факты заставляют искать другое объяснение изменениям в деятельности грязевых вулканов, которые наблюдаются после землетрясения.

В предложенной нами модели фильтрации флюидов в грязевулканических структурах предполагается, что газ и водогрязевая смесь являются несмешивающимися жидкостями, то есть слой водогрязевой смеси считается полностью непроницаемым для газа. Однако необходимо учитывать и другие механизмы миграции флюидов в канале вулкана. Речь идет о растворении газа в водогрязевой смеси и дальнейшем его переносе в растворенном виде путем диффузии. С течением времени столб водогрязевой смеси насыщается растворенным газом. Когда концентрация растворенного газа превышает некоторое значение, которое является предельным для данных термобарических условий, происходит выделение части растворенного газа в свободную фазу. Часть растворенного газа выделяется в свободную фазу также при декомпрессии, которая возникает при подъеме водогрязевой смеси по разлому. Большое количество растворенного в водогрязевой смеси CO_2 способствует интенсивному гидролизу вмещающих алюмосиликатных пород с образованием гидрокарбонатов Ca, Fe, Mg и Mn. Последние также мигрируют на значительные расстояния вверх по ка-

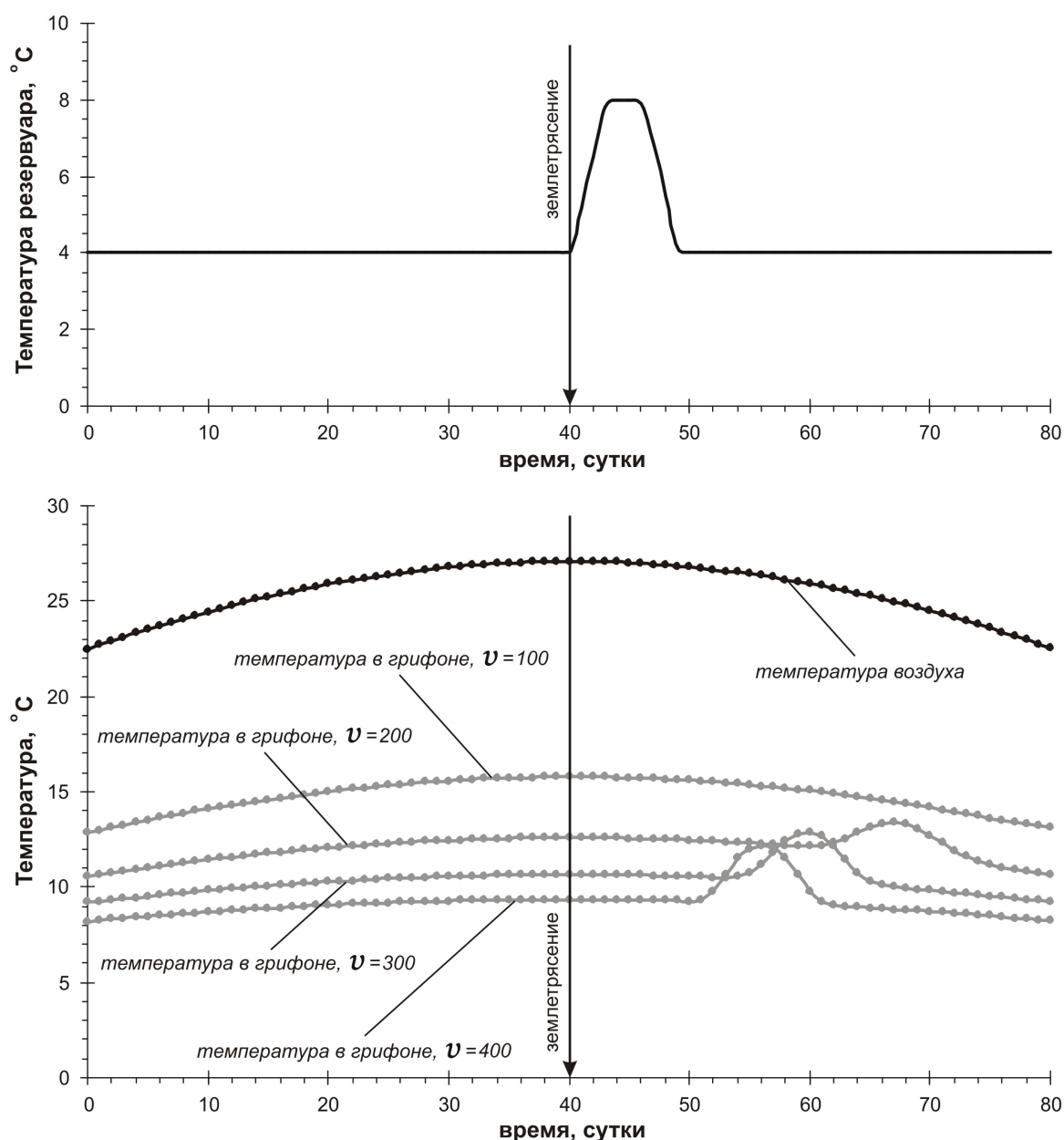


Рис. 7. Расчетные изменения температуры на нижнем конце канала, температуры воздуха и температуры водогрязевой смеси для грифонов с различной безразмерной скоростью движения смеси. v – безразмерная скорость движения водогрязевой смеси в грифонном канале.

Fig. 7. Calculated changes of temperature in the lower termination of the channel, air temperature and temperature of the water-mud mixture for the blowouts, considering different dimensionless rates of displacement of the mixture. v – dimensionless rate of displacement of the water-mud mixture in the blowout channel.

налу вулкана.

С учетом этого наблюдаемые аномалии можно объяснить взаимодействием «вода–порода–газ» в верхней части подводящего канала грязевого вулкана [Ershov *et al.*, 2010b]. Средний период времени между извержениями Южно-Сахалинского грязевого вулкана составляет около 20 лет, поэтому можно считать, что водогрязевая смесь в канале вулкана насыщена растворенными газами. Известно, что объем растворенного в жидкости газа пропорционален давлению газа. Простейший пример такой зависимости – закон Генри для

разбавленных растворов при невысоких давлениях. Сейсмические волны от землетрясения, проходя через грязевой вулкан, вызывают перепад давления в канале вулкана. В водогрязевой смеси находится во взвешенном состоянии большое количество частиц горных пород, то есть для водогрязевой смеси характерна высокая концентрация зародышей кавитации. Отсюда следует, что сейсмическое воздействие от землетрясения на канал вулкана может вызвать акустическую кавитацию – разрыв сплошности водогрязевой смеси и появление парогазовых пузырьков. Часть растворенного

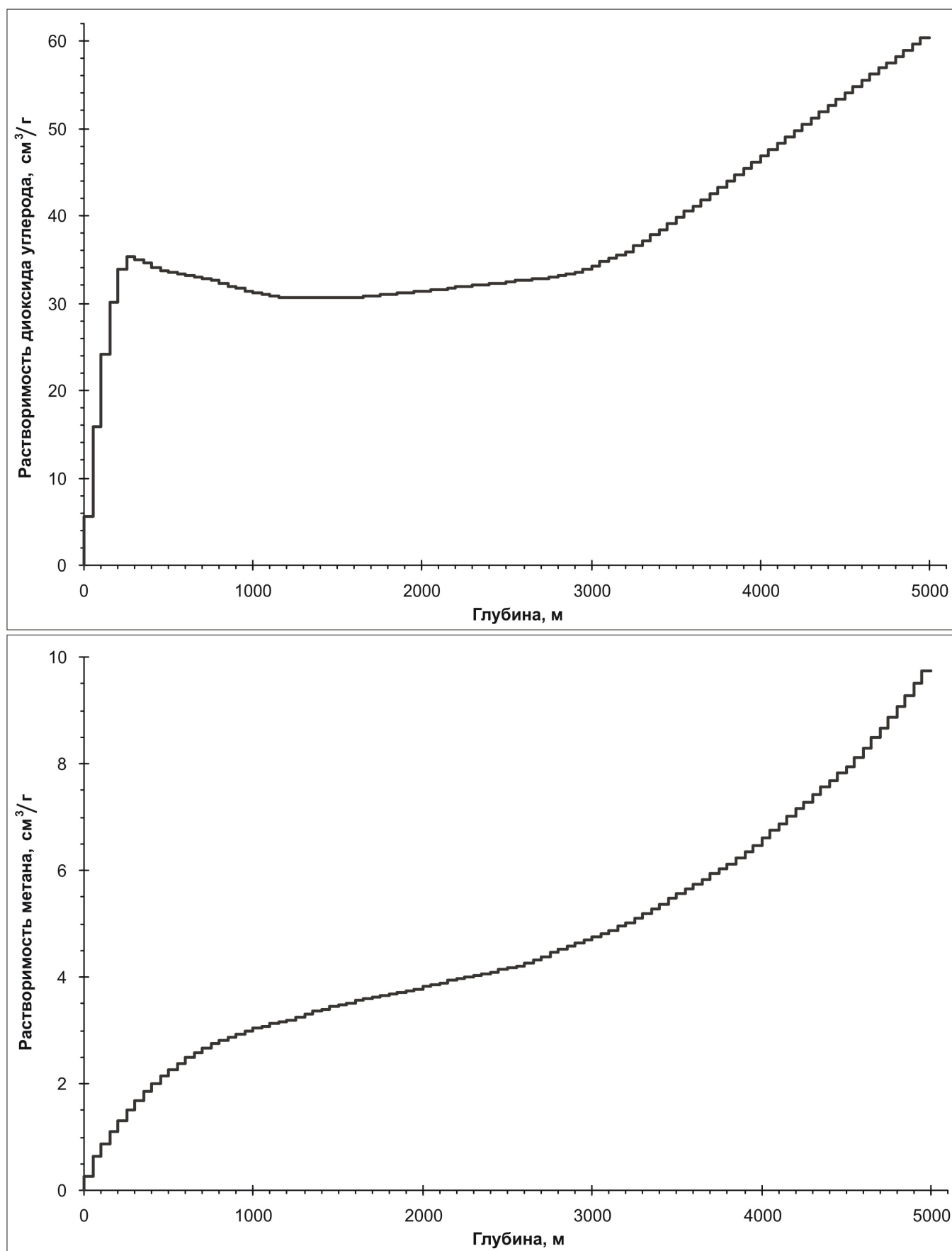


Рис. 8. Распределение по глубине растворимости в воде CO_2 и CH_4 в подводящем канале грязевого вулкана.

Fig. 8. The depth distribution of solubility of CO_2 and CH_4 in water in the feeder channel of the mud volcano.

газа перейдет в свободную фазу, что и приведет к наблюдавшемуся нами увеличению дебита свободных газов в грифонах.

Поскольку CH_4 и CO_2 имеют различные зависимости растворимости от глубины (рис. 8), при этом изменяется также и химический состав свободных газов. Указанные зависимости построены на основе работы [Namiot, 1991], в которой обобщено большое количе-

ство экспериментальных данных по растворимости CH_4 и CO_2 в воде при различных температурах и давлениях. Методом наименьших квадратов был получен ряд полиномов второй и третьей степени, аппроксимирующих эти данные. Задавая значения температуры и давления в подводящем канале вулкана, можно получить зависимость растворимости CH_4 и CO_2 от глубины. Считалось, что давление газа в канале вулкана на

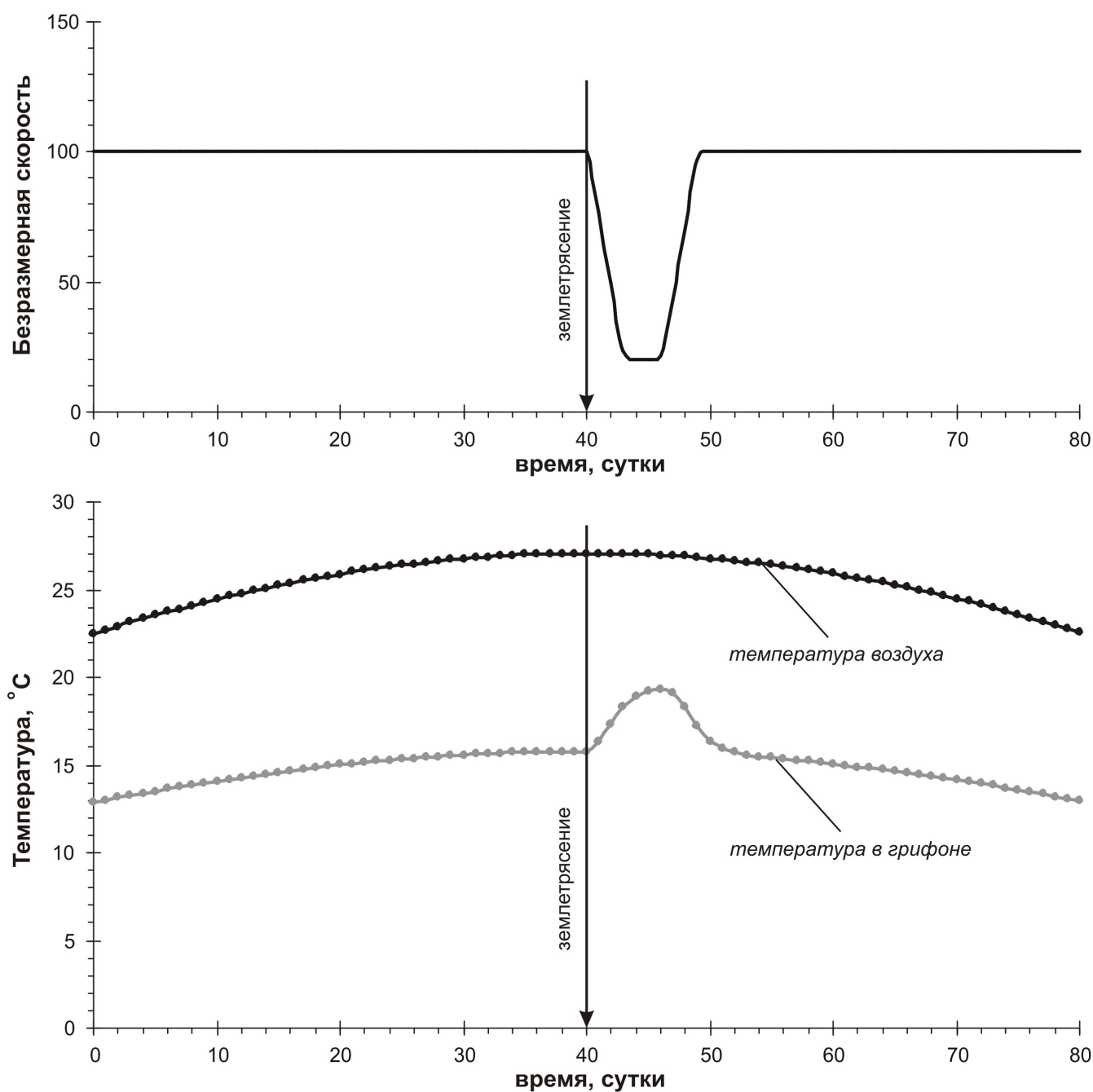


Рис. 9. Расчетные изменения безразмерной скорости движения водогрязевой смеси, температуры воздуха и температуры водогрязевой смеси в грифоне.

Fig. 9. Calculated changes of the dimensionless rate of displacement of the water-mud mixture, air temperature and temperature of the water-mud mixture in the blowout.

глубине h равно гидростатическому давлению столба водогрязевой смеси на этой же глубине: $p = \rho_{\text{гз}} g h$, где $\rho_{\text{гз}} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность водогрязевой смеси. Температура газа в канале на глубине h считалась равной температуре вмещающих пород на этой же глубине: $T = (\partial T / \partial h) h$, где $\partial T / \partial h = 30 \text{ }^\circ\text{C/км}$ – геотермический градиент. В итоге, разбивая подводящий канал на участки длиной $\Delta h = 50 \text{ м}$ и усредняя растворимость газов на каждом участке, получим распределение по глубине содержания растворенных газов в канале вулкана. Приведенные зависимости являются приближенными; в частности, здесь рассматривается растворимость газов в чистой воде, то есть без учета эффекта высаливания.

В работе [Domanskii, Ershov, 2010] на основе простой приближенной модели нами показана принципиальная возможность изменения дебита и химического состава свободных газов в грифонах вулкана после сейсмического воздействия.

Отмеченная выше тенденция к постепенному восстановлению прежнего химического состава свободных газов, наблюдаемая в течение нескольких месяцев после землетрясения, отражает, по нашему мнению, процесс повторного насыщения водогрязевой смеси растворенным газом, который поступает из питающей вулкан газовой залежи. Отсюда следует, что в течение этих нескольких месяцев грязевой вулкан будет слабо чувствителен к последующим возможным землетрясениям в регионе.

Уменьшение в водогрязевой смеси концентрации растворенного CO_2 приводит к смещению химического равновесия в растворе, разрушению гидрокарбонатов и образованию карбонатов, среди которых в первую очередь осаждаются малорастворимые карбонаты Ca, Fe, Mg и Mn. В результате после землетрясения водогрязевая смесь становится более густой и вязкой, в смеси повышается содержание указанных элементов. Увеличение вязкости смеси приводит к уменьшению количества смеси, изливаемой из грифона за единицу времени. В некоторых грифонах существенное повышение дебита свободных газов, несмотря на увеличение вязкости водогрязевой смеси, приводит к увеличе-

нию количества смеси, изливаемой из грифона за единицу времени.

Результаты математического моделирования теплопереноса в грифонных каналах показывают, что вариации скорости движения водогрязевой смеси в канале приводят к аномальным изменениям температуры смеси [Ershov et al., 2010a]. Увеличение скорости приводит к появлению отрицательных температурных аномалий, а уменьшение – к появлению положительных температурных аномалий (рис. 9).

Отметим, что предложенный нами механизм позволяет непротиворечиво и с единых позиций объяснить весь комплекс наблюдаемых аномалий в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных нами комплексных исследований показывают, что наблюдаемые после землетрясения аномалии в деятельности грязевого вулкана не всегда следует объяснять дополнительным подтоком глубинных флюидов. Потоки воды и газа в подводящем канале вулкана, а также вмещающие алюмосиликатные породы образуют специфическую геохимическую систему. Здесь происходит гидролиз алюмосиликатов с формированием вторичных минеральных фаз, которое может происходить на большом расстоянии от исходных пород. Данная многокомпонентная система чувствительна к внешним воздействиям.

Таким образом, грязевые вулканы, а также, вероятно, многие другие природные флюидодинамические системы не следует рассматривать только как пути миграции глубинных флюидов, то есть как пассивные геологические структуры. Разломы, которые являются подводящими каналами грязевых вулканов, необходимо рассматривать как активные физические и геологические тела. В разломах протекают собственные физико-химические процессы, которые следует более полно учитывать при моделировании деятельности различных флюидодинамических систем и интерпретации данных натурных наблюдений.

7. ЛИТЕРАТУРА

- Aliev Ad.A., 2006. Mud volcanism of the South Caspian basin. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* 3, 35–51 (in Russian) [Алиев Ад.А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51].
- Astakhov A.S., Sergeev K.F., Mel'nikov O.A., Prisyazhnyuk A.V., Shakirov R.B., Brovko P.F., Kiselev V.I., 2002. Dynamics of defluidization of the deep-seated Central Sakhalin fault during seismic activation: results of monitoring of the Southern Sakhalin mud volcano in July–August 2001. *Doklady Earth Sciences* 386 (7), 742–747.
- Bonini M., 2009. Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics* 474 (1–3), 723–735. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>.
- Chaudhuri H., Ghose D., Bhandari R.K., Sen P., Sinha B., 2012. A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands. *Journal of Asian Earth Sciences* 46, 52–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2011.10.007>.

- Deville E., Guerlais S.-H., 2009. Cyclic activity of mud volcanoes – evidences from Trinidad (SE Caribbean). *Marine and Petroleum Geology* 26 (9), 1681–1691. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.03.002>.
- Domanskii A.V., Ershov V.V., 2010. Modeling of the seismic influence on dynamics of processes of mud volcanism. *Vestnik DVO RAN* 6, 94–100 (in Russian) [Доманский А.В., Ершов В.В. Моделирование сейсмического воздействия на динамику грязевулканических процессов // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 94–100].
- Domanskii A.V., Ershov V.V., 2011. Fluid-dynamic modeling of mud volcanism. *Russian Geology and Geophysics* 52 (3), 368–376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.009>.
- Domanskii A.V., Ershov V.V., Levin B.W., 2009. A mathematical model of unsteady flows of geofluids in mud volcanic processes. *Doklady Earth Sciences* 424 (1), 95–98. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010206>.
- Ershov V.V., Domanskii A.V., Levin B.V., 2010a. Modeling of the temperature regime of mud volcano gryphons. *Doklady Earth Sciences* 435 (1), 1529–1534. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10110267>.
- Ershov V.V., Levin B.W., Mel'nikov O.A., Domansky A.V., 2008. Manifestations of the Nevelsk and Gornozavodsk Earthquakes of 2006–2007 in the dynamics of gryphon activity of the Yuzhno-Sakhalinsk Gas-Water-Lithoclastic (Mud) Volcano. *Doklady Earth Sciences* 423 (2), 1443–1447. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X08090262>.
- Ershov V.V., Shakirov R.B., Melnikov O.A., Kopanina A.V., 2010b. Changes of features to activity of the mud volcano and their relationship with seismicity of the south of the Sakhalin Island. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya* 42, 49–57 (in Russian) [Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 49–57].
- Ershov V.V., Shakirov R.B., Obzhairov A.I., 2011. Isotopic–geochemical characteristics of free gases of the South Sakhalin mud volcano and their relationship to regional seismicity. *Doklady Earth Sciences* 440 (1), 1334–1339. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11090169>.
- Kasyanova N.A., 2003. Ecological Risks and Geodynamics. Nauchnyj mir, Moscow, 332 p. (in Russian) [Касьянова Н.А. Экологические риски и геодинамика. М.: Научный мир, 2003. 332 с.].
- Kopf A., Delisle G., Faber E., Panahi B., Aliyev C.S., Guliyev I., 2010. Long-term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, pore-pressure transients and methane emission. *International Journal of Earth Sciences* 99 (1), 227–240. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-009-0487-4>.
- Manga M., Brumm M., Rudolph M.L., 2009. Earthquake triggering of mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology* 26 (9), 1785–1798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.01.019>.
- Martinelli G., Dadomo A., 2005. Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Baku, Azerbaijan, 20–22 May, 2003. *Mud volcano monitoring and seismic events* 51, 187–199.
- Mel'nikov O.A., 1987. Structure and Geodynamics of Hokkaido-Sakhalin Folded Area. Nauka, Moscow, 95 p. (in Russian) [Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.].
- Mel'nikov O.A., 2002. Dislocations and seismicity of a southern part of the Tym-Poronaik upthrust-overthrust area. In: Tectonics, geodynamics, magmatism, metallogeny and seismicity of the Pacific segment of the Earth. IMGIG DVO RAN, Yuzhno-Sakhalinsk, p. 50–88 (in Russian) [Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. С. 50–88].
- Mel'nikov O.A., Ershov V.V., 2010. Mud (gas-water lithoclastic) volcanism Sakhalin Island: history, results and perspective of the studies. *Vestnik DVO RAN* 6, 87–93 (in Russian) [Мельников О.А., Ершов В.В. Грязевой (газоводолитокластический) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 87–93].
- Mel'nikov O.A., Ershov V.V., Kim C.U., Sen R.S., 2008. Dynamics of the gryphon activity of gas-water lithoclastic (mud) volcanoes and their relation to the natural seismicity as exemplified by Yuzhno-Sakhalinsk volcano (Sakhalin Island). *Russian Journal of Pacific Geology* 2 (5), 397–411. <http://dx.doi.org/10.1134/S1819714008050035>.
- Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G., 2007. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *Journal of Geophysical Research* 112 (4), 11. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004489>.
- Namiet A.Yu., 1991. Solubility of Gases in Water. Nedra, Moscow, 167 p. (in Russian) [Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде. М.: Недра, 1991. 167 с.].
- Panahi B.M., 2005. Mud volcanism, geodynamics and seismicity of Azerbaijan and the Caspian Sea region. Mud volcanoes, geodynamics and seismicity: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Baku, Azerbaijan, 20–22 May, 2003. Springer, Dordrecht, p. 89–104.
- Panahi B.M., Rakhmanov R.R., 1993. Mud volcano's earthquakes. *Vulkanologiya i seismologiya* 2, 98–102 (in Russian) [Панахи Б.М., Рахманов Р.Р. Грязевулканические землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 98–102].
- Prytkov A.S., 2008. Present crustal movements of Sakhalin-Kuril region and modeling of geodynamics processes as of GPS observations. Ph.D. Thesis. IMGIG DVO RAN, Yuzhno-Sakhalinsk, 22 p. (in Russian) [Прытков А.С. Современные движения земной коры Сахалино-Курильского региона и моделирование геодинамических процессов по данным GPS-наблюдений: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 22 с.].
- Safonov D.A., 2008. Dynamics of seismicity of South Sakhalin on base modern instrumental and macroseismic data. Ph.D.

Thesis. IMGIG DVO RAN, Yuzhno-Sakhalinsk, 24 p. (in Russian) [Сафонов Д.А. Динамика сейсмичности Южного Сахалина на основе современных инструментальных и макросейсмических данных: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 24 с.].

Shakirov R., Obzhirov A., Suess E., Salyuk A., Biebow N., 2004. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area. *Geo-Marine Letter* 24 (3), 140–149. <http://dx.doi.org/10.1007/s00367-004-0177-y>.

Voitov G.I., 2001. Chemical and carbon isotope instabilities in the gryphon gases of mud volcanoes: An example of the Southern Caspian and Taman mud-volcano province. *Geochemistry International* 39 (4), 373–383.

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., 2006. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: multi-parameter automatic gas monitoring results. *Pure and applied geophysics* 163 (4), 693–709. <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-006-0040-3>.



Ершов Валерий Валерьевич, научный сотрудник
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия
Тел.: 89147571054; ✉ e-mail: ershov@imgg.ru

Ershov Valery V., Researcher
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS
1B Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia
Tel.: 89147571054; ✉ e-mail: ershov@imgg.ru