

В. В. ЕРШОВ (Ин-т морской геол. и геофиз. ДВО РАН),
Р. Б. ШАКИРОВ (Тихоокеан. океанол. ин-т ДВО РАН),
О. А. МЕЛЬНИКОВ, А. В. КОПАНИНА (Ин-т морской геол. и геофиз. ДВО РАН)

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ ЮГА ОСТРОВА САХАЛИН

Излагаются результаты мониторинговых наблюдений за динамикой грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана, выполненных в полевые сезоны 2005–2007 гг. Выявлена связь изменений дебита газа, элементного состава и температуры водогрязевой смеси в грифонах грязевого вулкана с сильными землетрясениями. Предложен возможный механизм, который позволяет объяснить формирование всего комплекса аномалий для наблюдаемых параметров.

Ключевые слова: *грязевой вулканизм, геофлюиды, мониторинг, динамика, сейсмичность, о. Сахалин, вещественный состав, грифонная деятельность.*

The results of monitoring observations for track record of gryphon activity of Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano conducted during field seasons 2005–2007 are discussed in given article. The connection of the changes of discharge of the gas, element composition and temperature of mud-water mixture in gryphons of mud volcano with strong earthquakes in the region is revealed. It is offered possible mechanism, which allows explaining the formation of the whole complex of anomalies for observed parameter.

Key words: *mud volcanism, geofluids, monitoring, dynamics, seismicity, Sakhalin I., material composition, gryphon activity.*

Введение. Грязевые вулканы являются природными флюидодинамическими системами, в которых происходят интенсивный энергомассоперенос и миграция химических элементов из недр Земли на ее поверхность. Грязевой вулканизм обусловлен процессами дефлюидизации Земли, протекающими в разломных зонах земной коры. Считается, что состав глубинных флюидов и интенсивность их поставки находятся в тесной связи с эндогенными процессами.

Один из аспектов исследования грязевого вулканизма – анализ связи между различными параметрами грязевулканической деятельности и сейсмичностью [1–3, 5–8, 12, 14, 16–18, 20, 22–24]. Предполагается, что эти параметры зависят от активности разломных зон, контролирующих грязевые вулканы, и могут быть предвестниками тектонических землетрясений. Данный вопрос пока недостаточно изучен и не имеет однозначного ответа, что объясняется отсутствием необходимого количества эмпирических данных. Относительно хорошо изучены только геологические аспекты грязевого вулканизма, строение и морфология грязевых вулканов, тогда как целостной физической модели грязевулканических процессов пока не существует. Механизм связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью также представляется лишь в общих чертах.

Сахалин – единственный регион на Дальнем Востоке России, где известны наземные грязевые вулканы. Здесь выделяют четыре района проявления наземного грязевого вулканизма. Один находится на севере острова – Дагинская зона грязевого вулканизма, а три других на юге – группа Пугачевских грязевых вулканов, Южно-Сахалин-

ский и Лесновский грязевые вулканы [15]. Самый крупный, активный и хорошо изученный Южно-Сахалинский вулкан расположен в зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига – одного из основных структурно-тектонических элементов Сахалина.

В полевые сезоны 2005–2007 гг. Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) проведены комплексные мониторинговые наблюдения за дебитом газа, температурой и элементным составом водогрязевой смеси в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

Наблюдения с 18 июня по 3 сентября 2005 г. выполнены 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 расстояния 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.

Цель исследований – оценка изменчивости наблюдаемых параметров и анализ корреляций между ними и сейсмическими событиями в регионе.

Методы исследований. Проводился визуальный осмотр всех грифонов на предмет выявления существенных изменений в их деятельности. При помощи цифрового термометра с водонепроницаемым стальным щупом измерялись температура водогрязевой массы в грифонах на глубине

15–20 см, температура поверхности грязевого поля на глубине около 20 см и температура воздуха. Разрешение термометра в диапазоне от -50 до $+200$ °C составляло $0,1$ °C. Поскольку температура в грифоне различна по вертикали и горизонтали, то водогрязевая смесь непосредственно перед измерением слегка перемешивалась. Дебит свободных газов, выделявшихся из грифонов, измерялся при помощи воронки, секундомера и сосуда с известной емкостью. Для анализа элементного состава отбирались пробы свежей водогрязевой смеси, изливаемой грифонами. В полевом сезоне 2005 г. в ряде случаев проводился анализ минерального состава грязевой массы. В полевом сезоне 2007 г. отбирались пробы свободных газов для анализа его химического состава и изотопного состава углерода метана и углекислого газа.

Элементный состав водогрязевой смеси определялся в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН (г. Владивосток) на атомно-эмиссионном спектрометре «ICAP 6500 Duo». Здесь же определялся и изотопный состав свободных газов на масс-спектрометре «Finnigan MAT-252». Хроматографический анализ свободных газов выполнялся в Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток) на хроматографе «Кристалл-Люкс 4000М», рентгенофазовый анализ – в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии им. А. А. Трофимука (г. Новосибирск) на приборе «ДРОН-3М» (с Си-монохроматизированным излучением). Данные по региональной сейсмичности получены с помощью сети цифровых сейсмостанций «Dat» и «Datamark».

Результаты и их обсуждение. В ходе визуальных наблюдений за деятельностью грифонов выявлено, что после Горнозаводского и Невельского землетрясений активность большинства грифонов существенно увеличилась. В ряде грифонов произошло сильное изменение густоты водогрязевой смеси вплоть до вязкой пластичной массы. Отметим, что для таких грифонов после землетрясений значительно уменьшилось количество изливаемой водогрязевой смеси. Описанные эффекты постепенно «затухали» в течение нескольких дней.

Основным фактором, определяющим изменение температуры водогрязевой смеси в грифоне, является температура воздуха [9]. Такие факторы, как скорость истечения водогрязевой смеси из грифона и физические свойства водогрязевой смеси (вязкость, плотность, температуропроводность и т. д.), оказывают более слабое влияние. Однако изменения температуры водогрязевой смеси, вызванные этой группой факторов, представляют в нашем случае наибольший интерес, поскольку они связаны с эндогенными процессами. Оценить такие изменения можно после удаления в полученных рядах наблюдений осредненной зависимости температуры водогрязевой смеси от температуры воздуха. Температура воздуха имеет значительную высокочастотную составляющую, поэтому для большей корректности предлагаемой процедуры необходимо учесть тепловую инерцию грифона. Это позволяет сделать такой параметр, как температура поверхности грязевого поля [9].

При регрессионном анализе нами использовалась статистическая модель

$$T_{гр} = f(T_b, T_n) + \varepsilon = k_1 T_b + k_2 T_n + k_3 + \varepsilon,$$

где $T_{гр}$ – температура водогрязевой смеси в грифоне, $f(T_b, T_n)$ – детерминированная составляющая, T_b – температура воздуха, T_n – температура поверхности грязевого поля, ε – случайная величина, имеющая нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией.

Линейная регрессия на температуру воздуха и температуру поверхности грязевого поля позволяет объяснить до 90% дисперсии температуры водогрязевой смеси в грифоне. Значительные отклонения от линейной зависимости рассматриваются как изменения в деятельности грифона. О таких отклонениях можно судить по остаткам, полученным после удаления детерминированной составляющей. При анализе остатков обнаружены аномальные изменения температуры водогрязевой смеси в ряде грифонов вулкана после Горнозаводского и Невельского землетрясений. При наблюдении в 2005 г. подобных аномалий не обнаружено. На рис. 1 показаны хорошо выраженные положительные аномалии температуры водогрязевой смеси в Главном грифоне, который считается связанным с главным подводным каналом вулкана. Отметим, что в ряде грифонов после Горнозаводского и Невельского землетрясений возникали отрицательные аномалии температуры водогрязевой смеси, часть грифонов никак не отреагировала на данные землетрясения [12].

Предлагаем следующую интерпретацию описанных аномалий температуры водогрязевой смеси. При стационарном течении водогрязевой смеси в грифоне коэффициенты в уравнении линейной регрессии для температуры водогрязевой смеси постоянны (в пределах погрешности измерений). Графики остатков (после удаления регрессии) для таких грифонов будут представлять случайные флуктуации около нулевого значения. Уменьшение скорости течения водогрязевой смеси приводит к увеличению значений коэффициентов в уравнении регрессии и появлению положительных аномалий на графике остатков. Увеличение скорости течения водогрязевой смеси приводит к уменьшению значений коэффициентов в уравнении регрессии и появлению отрицательных аномалий на графике остатков.

Предложенная интерпретация результатов статистического анализа хорошо согласуется с результатами математического моделирования температурного режима грифонов грязевых вулканов [11]. Моделирование выполнено на основе нестационарного уравнения теплопроводности с конвективным слагаемым. Из полученного решения соответствующей начально-краевой задачи следует, что для летнего периода наблюдений уменьшение скорости течения водогрязевой смеси в грифоне приводит к увеличению температуры водогрязевой смеси и наоборот. Отметим, что возможно альтернативное предположение о причине изменения температуры водогрязевой смеси в грифонах. Такой причиной мог бы быть интенсивный подъем после землетрясения к поверхности грязевулканической структуры более горячих глубинных геофлюидов. Однако

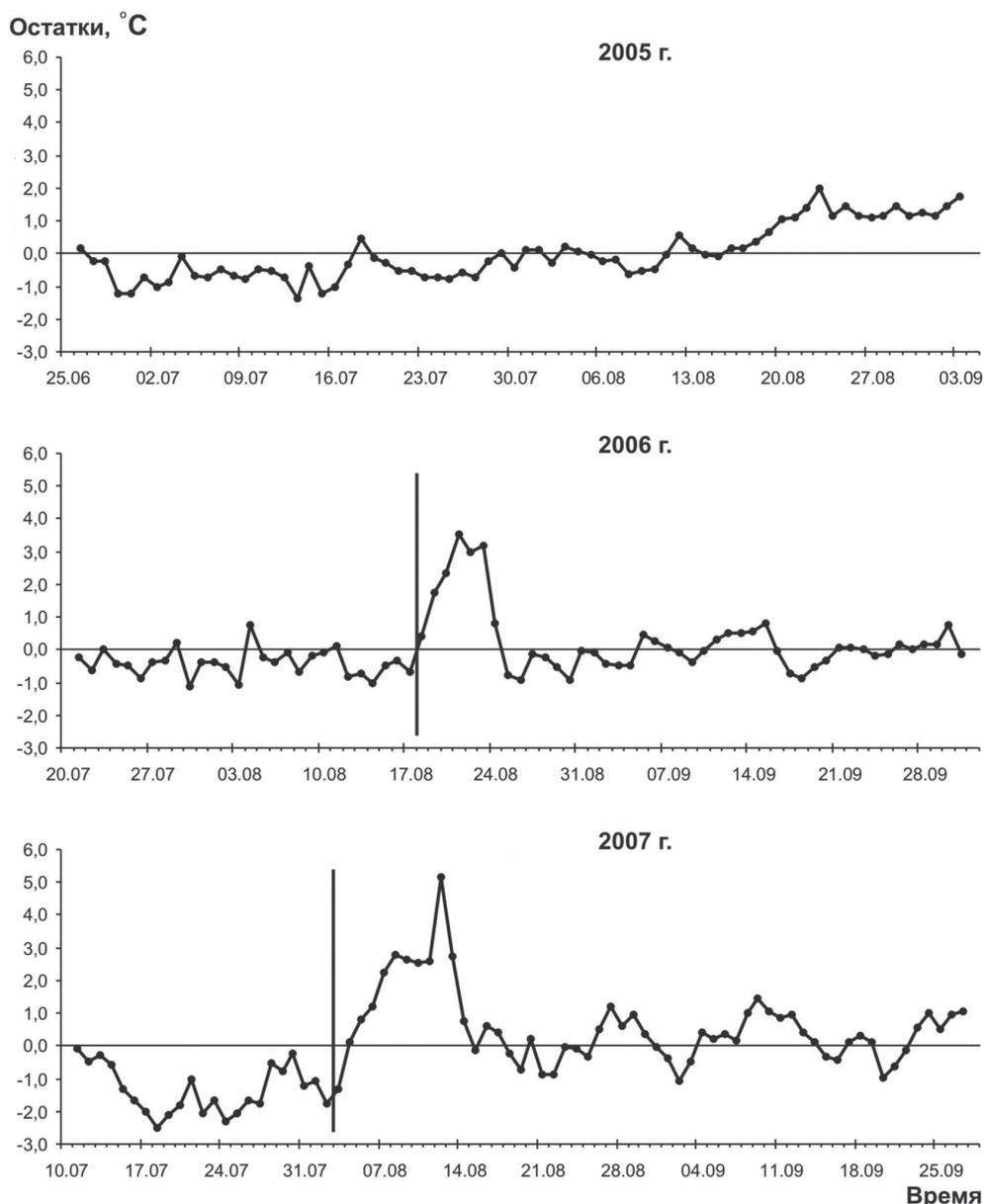


Рис. 1. Отклонения от линейной регрессии для температуры водогрязевой смеси в Главном грифоне с указанием даты Горнозаводского и Невельского землетрясений

результатами математического моделирования это не подтверждается.

Дебит газа в грифонах летом 2005 г. изменялся незначительно, в относительно небольших пределах и имел слабую периодическую составляющую [10]. При наблюдениях в 2006 и 2007 гг. после Горнозаводского и Невельского землетрясений отмечено резкое увеличение дебита газа в 2–5 раз по сравнению с его средним уровнем до землетрясений. На рис. 2 показаны изменения дебита газа в грифоне Напарник, расположенном возле Главного грифона.

Результаты исследований позволяют утверждать, что сильные землетрясения влияют также на химический состав свободных газов Южно-Сахалинского вулкана (рис. 3). Отметим, что в его химическом составе преобладают метан и углекислый газ [22]. Данные газогеохимических наблюдений

разделены на две части (до и после Невельского землетрясения) и проанализированы отдельно.

Содержания CO_2 и CH_4 до землетрясения не имеют явно выраженных трендов и рассматривались как случайные величины с произвольным распределением. Для этих случайных величин вычислены точечные и интервальные оценки математических ожиданий m , которые для доверительной вероятности $\alpha = 0,99$ будут равны: $m_{\text{CO}_2} = 78,6 \pm 0,83\%$, $m_{\text{CH}_4} = 19,6 \pm 0,84\%$.

Содержания CO_2 и CH_4 после землетрясения имеют хорошо выраженные линейные тренды (рис. 3). Методом наименьших квадратов построено уравнение линейной регрессии

$$N = at + b,$$

где N – содержание компонента газовой смеси (%), t – время, которое прошло после землетрясения

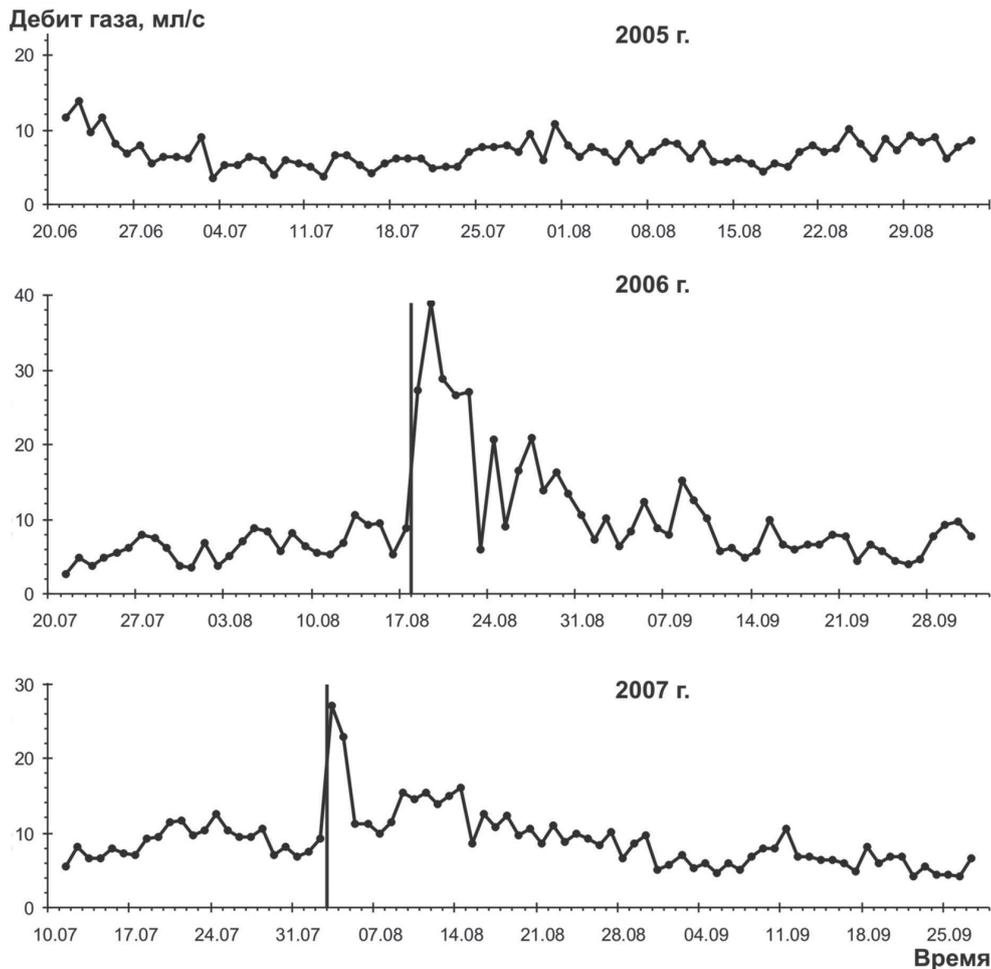


Рис. 2. Дебит газа в грифоне Напарник с указанием даты Горнозаводского и Невельского землетрясений

(сут), a и b – искомые коэффициенты. Полученные линейные зависимости содержания CO_2 и CH_4 от времени и их коэффициенты детерминации имеют вид

$$N_{\text{CO}_2} = (0,11 \pm 0,031)t + (69,4 \pm 1,00), \\ R^2_{\text{CO}_2} = 0,64,$$

$$N_{\text{CH}_4} = (-0,11 \pm 0,028)t + (27,8 \pm 0,91), \\ R^2_{\text{CH}_4} = 0,68.$$

Уравнения и их коэффициенты статистически значимы практически с любой степенью достоверности. Доверительные интервалы для коэффициентов в уравнении регрессии построены для доверительной вероятности $\alpha = 0,99$.

С учетом оценок для среднего значения содержания компонента газовой смеси до и после землетрясения выполнена оценка косейсмического изменения ΔN содержания CO_2 и CH_4 :

$$\Delta N = b - m.$$

Вычисленные оценки косейсмического изменения $\Delta N_{\text{CO}_2} = -9,2$ и $\Delta N_{\text{CH}_4} = 8,2\%$.

Сделана оценка времени релаксации системы. Будем понимать под ним интервал времени τ после землетрясения, который необходим для восстановления прежних значений содержания CO_2 и CH_4 в составе свободных газов. Время релаксации

$$\tau = (m - b)/a.$$

Вычисленные оценки времени релаксации $\tau_{\text{CO}_2} = 80$ и $\tau_{\text{CH}_4} = 72$ сут.

Вопрос об особенностях формирования химического состава свободных газов грязевых вулканов и закономерностях его изменения рассматривался различными исследователями [5, 7, 13, 14]. В работе [5] нестабильность состава объясняется механическим смешением газов из отдельных пластовых и трещинных коллекторов, вскрываемых подводными каналами грязевых вулканов. Аналогичное предположение об участии в формировании состава газов грязевых вулканов нескольких различных источников (резервуаров) сделано в работе [13]. В работе [1] указано, что грифоны имеют свои изолированные подводные каналы, которые связаны с различными глубинами залегания источников углеводородных газов. Здесь же утверждается, что при активизации грязевулканической деятельности происходит вынос геофлюидов с более глубоких горизонтов.

Подобные предположения не соответствуют результатам анализа изотопного состава углерода метана и углекислого газа в грифоне Напарник. С учетом возможного небольшого загрязнения газовой пробы атмосферным воздухом и наличия аналитической ошибки можно считать, что по-

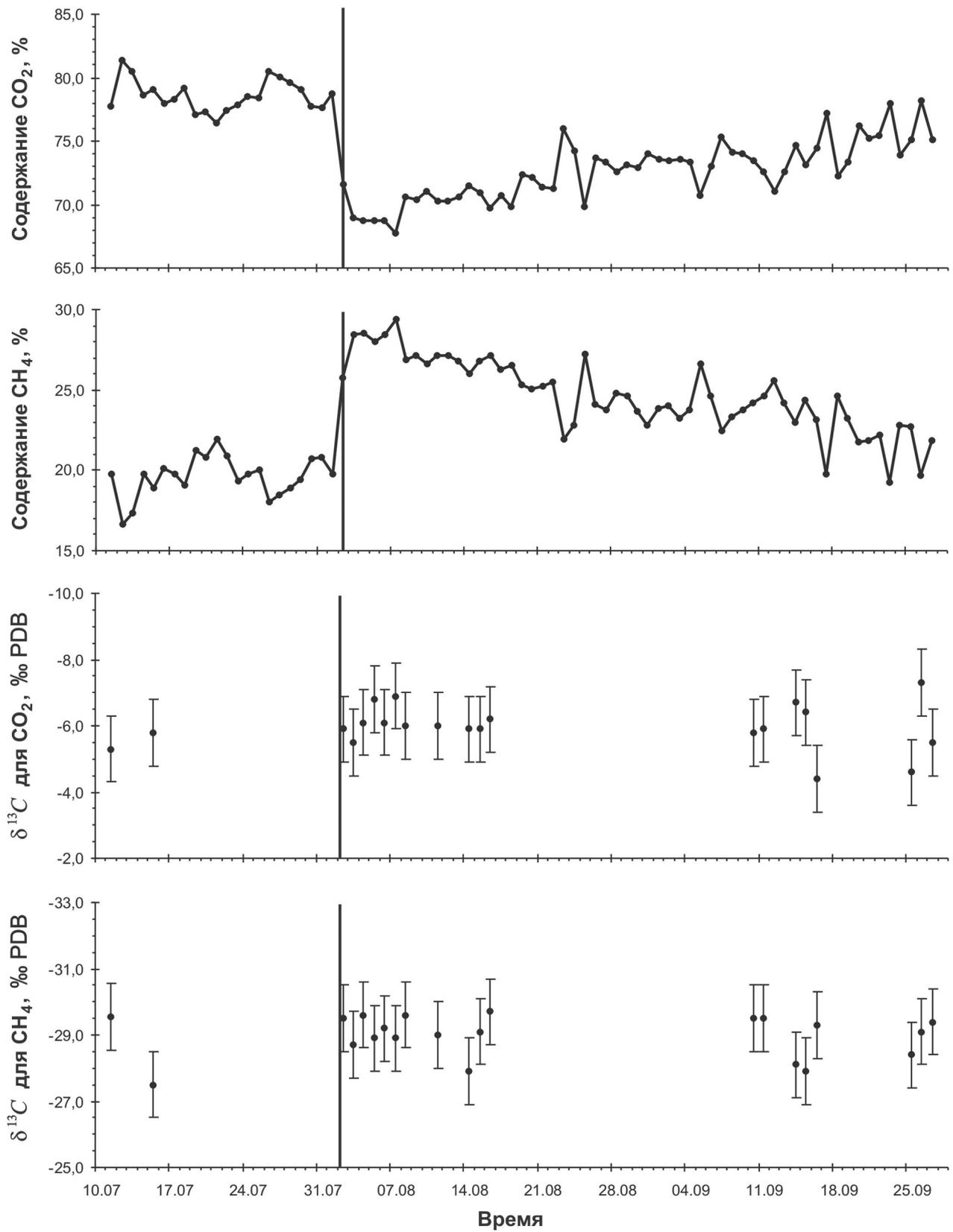


Рис. 3. Химический и изотопный состав свободных газов в грифоне Напарник для периода наблюдений 2007 г. с указанием даты Невельского землетрясения

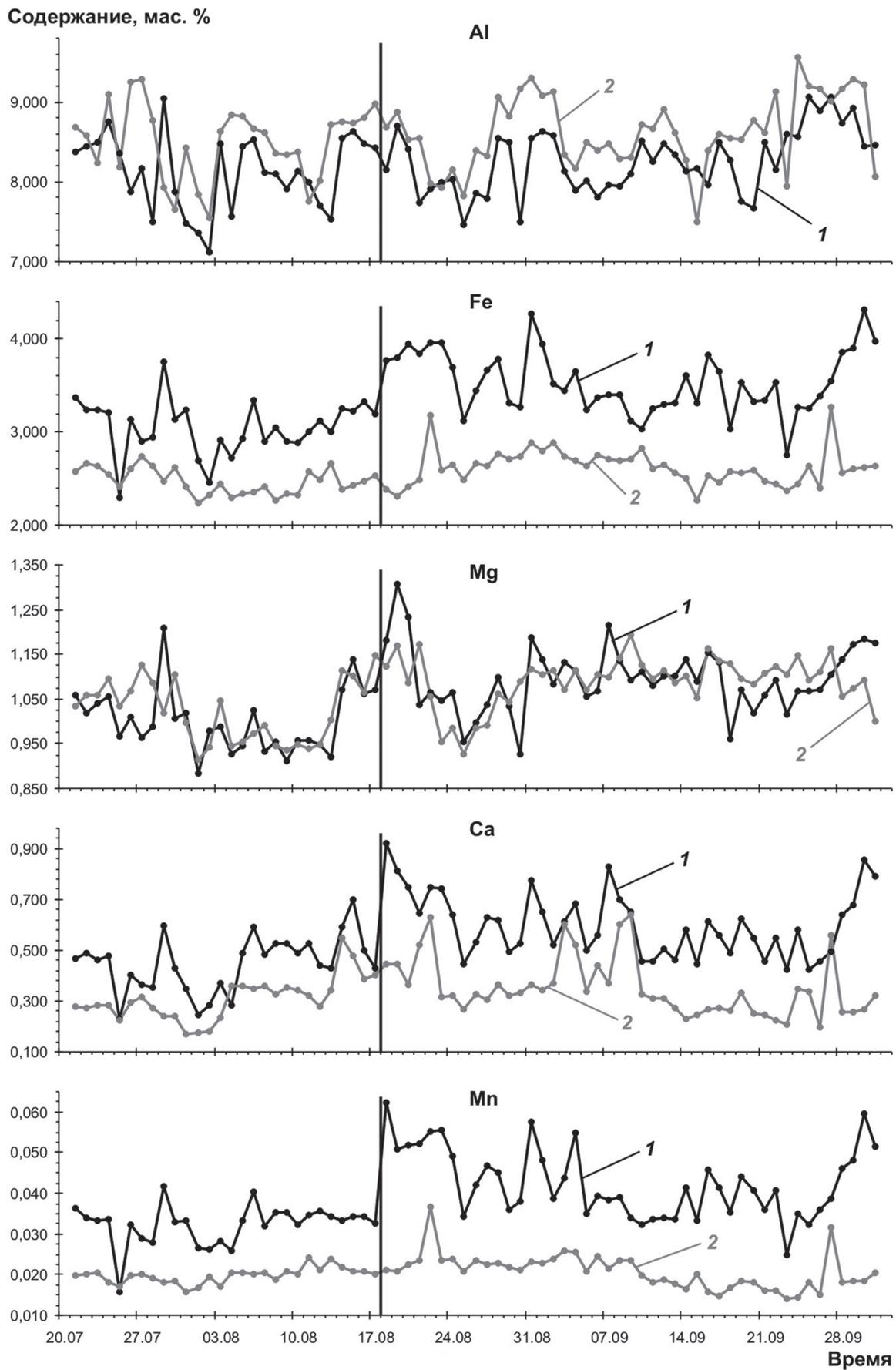


Рис. 4. Элементный состав водогрязевой смеси в Главном грифоне (1) и грифоне Пассивный (2) для периода наблюдений 2006 г. с указанием даты Горнозаводского землетрясения

грешность определения изотопного состава около 1‰ PDB. Полученные данные показывают, что изотопный состав свободных газов в грифоне Напарник остается практически постоянным для всего периода наблюдений 2007 г. (рис. 3). Следовательно, вынос глубинных геофлюидов не может считаться основной причиной активизации деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана после Невельского землетрясения.

Предлагаем следующую интерпретацию описанных аномалий дебита газа. Известно, что объем растворенного в жидкости газа пропорционален давлению газа. Прохождение через грязевулканическую структуру сейсмических волн от землетрясения вызывает резкий перепад давления, что способствует переходу части растворенного газа в свободную фазу. Это приводит к существенному увеличению дебита газа в грифонах грязевого вулкана после землетрясения.

Временные ряды элементного состава водогрязевой смеси имеют локальные экстремумы содержания Fe, Mg, Ca и Mn в окрестностях дат, соответствующих Горнозаводскому и Невельскому землетрясениям. На рис. 4 показаны изменения элементного состава для Главного грифона. Однако подобные экстремумы имеются и для других дат, что затрудняет интерпретацию полученных данных. Скорее всего сложный и неоднозначный характер вариаций элементного состава водогрязевой смеси обусловлен большим количеством различных физико-химических процессов, протекающих в подводящих каналах грязевых вулканов. Подводящий канал представляет собой трещиновато-пористую среду, в которой происходит движение многокомпонентной смеси газа, жидкости и частиц горных пород. Внешние воздействия (в частности, землетрясения) приводят к изменениям структуры трещиновато-пористой среды, термобарических условий в системе, а также привносу в систему вещества из вмещающих пород. Это влияет на кинетику физико-химических процессов и процессы фильтрации геофлюидов в подводящем канале. В конечном итоге изменяется вещественный состав водогрязевой смеси, изливаемой грифонами грязевого вулкана.

Один из факторов, оказывающих основное влияние на динамику элементного состава водогрязевой смеси в грифонах, – состав и интенсивность поступления газа. Это подтверждается результатами статистического анализа элементного состава Главного грифона и грифона Пассивный (с малым дебитом газа). Отметим, что при этом анализе содержания элементов в водогрязевой смеси рассматривались как случайные величины с нормальным распределением. На уровне $\delta = 0,01$ для этих грифонов статистически значимо различаются средние содержания Al, Fe, Ca и Mn (рис. 4). На уровне $\delta = 0,10$ для этих грифонов статистически значимо различаются также дисперсии содержания Fe, Ca и Mn (рис. 4). Наблюдается различный характер зависимости между содержаниями отдельных элементов (таблица, жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на уровне $\delta = 0,01$). Видно, что в Главном грифоне содержания Fe, Mg, Ca и Mn имеют между собой очень высокие коэффициенты корреляции. Другими словами, в грифоне с интенсивно посту-

**Корреляционные матрицы
элементного состава водогрязевой смеси
в Главном грифоне и грифоне Пассивный
для периода наблюдений 2006 г.**

| Элементы | Al | Fe | Mg | Ca | Mn | Ti |
|-------------------------|----|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Главный грифон</i> | | | | | | |
| Al | 1 | 0,31 | 0,52 | 0,23 | 0,11 | 0,62 |
| Fe | | 1 | 0,74 | 0,82 | 0,92 | 0,09 |
| Mg | | | 1 | 0,72 | 0,62 | 0,42 |
| Ca | | | | 1 | 0,88 | 0,20 |
| Mn | | | | | 1 | -0,02 |
| Ti | | | | | | 1 |
| <i>Грифон Пассивный</i> | | | | | | |
| Al | 1 | 0,22 | 0,45 | 0,07 | -0,13 | 0,58 |
| Fe | | 1 | 0,36 | 0,42 | 0,66 | 0,08 |
| Mg | | | 1 | 0,34 | -0,04 | 0,50 |
| Ca | | | | 1 | 0,74 | 0,19 |
| Mn | | | | | 1 | -0,15 |
| Ti | | | | | | 1 |

пающим газом (с высоким содержанием CO₂) весьма похожим образом ведут себя элементы, катионы которых входят в состав гидрокарбонатных соединений.

Данные факты позволяют считать, что состав и интенсивность поступления газа в грифонах в значительной степени определяют элементный состав водогрязевой смеси в грифонах. Изменения состава и интенсивности поступления газа приводят к изменению элементного состава. Это согласуется с результатами исследования аутигенных минералов грязевых вулканов о. Сахалин [21]. Авторами этой работы сделано предположение о том, что углекислый газ способствует миграции многих элементов в подводящих каналах грязевых вулканов в форме растворимых гидрокарбонатных комплексов. При удалении части углекислого газа может происходить осаждение карбонатов из раствора.

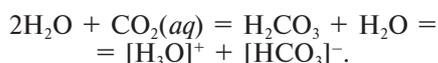
Известно, что для участков проявления грязевого вулканизма характерно наличие мощных глинистых толщ, материал которых составляет основную часть грязевой массы, выносимой грязевыми вулканами на поверхность Земли. Глины являются сложными многокомпонентными дисперсными породами, основная масса которых состоит из глинистых минералов с переменным количеством примесей терригенных, аутигенных и эпигенетических минералов, обломков пород, коллоидных веществ, поглощенных катионов и т. п. Минеральный состав глин весьма разнообразен и зависит от фациальных и климатических условий их образования и геологического возраста [19].

Согласно результатам рентгенофазового анализа, в грязевой массе, изливаемой Главным грифоном Южно-Сахалинского грязевого вулкана, в больших количествах присутствуют кварц, плагиоклаз, слюда мусковитового типа, калиевый поле-

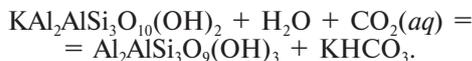
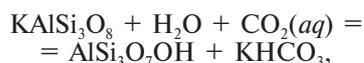
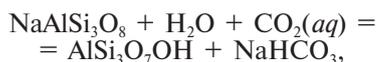
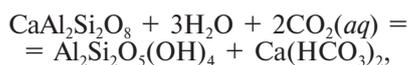
вой шпат, смектит и смешаннослойный минерал иллит-смектит. В небольших количествах содержатся галит, Fe-Mg хлорит, каолинит, кальцит и пирит. Таким образом, грязевая масса, изливаемая грифонами, представлена в основном алюмосиликатными минералами.

Предлагаемая нами следующая общая схема позволяет непротиворечиво объяснить весь комплекс наблюдаемых аномалий. Отметим, что она достаточно идеализирована, на практике рассматриваемые процессы протекают совместно с другими возможными процессами.

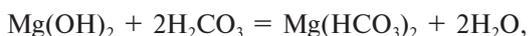
Основным компонентом свободных газов вулкана является углекислый газ (около 70–80%), который диссоциирует в воде при растворении. Часть его молекул остается в растворенном состоянии, часть переходит в соединения с водой или в ионы. Продуктом химического взаимодействия CO_2 и H_2O является угольная кислота, которая существует в растворе в виде гидрокарбонат-ионов и ионов гидроксония:



В данном растворе происходит гидролиз алюмосиликатных минералов с образованием ряда гидрокарбонатов:



Хлориты структурно представлены слоистыми алюмосиликатными пакетами, между которыми расположены слои состава $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Al}(\text{OH})_6$, соединенные с этими пакетами остаточными связями за счет гидроксидных групп [4]. При взаимодействии хлоритов с растворенным в воде CO_2 происходит выщелачивание Mg^{2+} и Fe^{2+} :



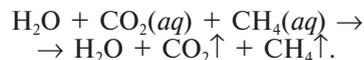
Валовой анализ минерального состава показывает наличие только основных минералов, составляющих анализируемый образец. Можно предположить, что в грязевой массе содержится небольшое количество такого минерала группы хлоритов, как пеннантит $(\text{Mn}_5\text{AlSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_8)$. Тогда можно записать:



Для монтмориллонита характерно слоистое расположение катионов и анионов в кристаллической решетке. Этим объясняются высокая поглотительная способность монтмориллонита и его катионообменные свойства [4]. Учитывая слабые химические связи в кристаллической решетке монтмориллонита между катионами и анионами, можно предположить, что в водной среде, насыщенной

CO_2 , происходит вынос катионов Na^+ , Mg^{2+} и Fe^{2+} с образованием гидрокарбонатов.

Известно, что количество растворенного в жидкости газа пропорционально давлению газа. При относительно близком и сильном землетрясении выделяется большое количество энергии в виде сейсмических волн, которые проходят через грязевулканическую структуру и вызывают резкий перепад давления, что способствует переходу части растворенного газа в свободную фазу:



Следовательно, дебит газа в грифонах после землетрясения увеличивается.

Уменьшение концентрации растворенного углекислого газа приводит к разрушению гидрокарбонатов и образованию карбонатов, среди которых в первую очередь осаждаются малорастворимые карбонаты:



Осаждение карбонатов приводит к переходу водогрязевой смеси в гелеобразное состояние. В результате после землетрясения водогрязевая смесь становится более густой и в ней повышается содержание Fe, Mg, Ca и Mn.

В дальнейшем углекислый газ, поступающий из грязевулканического резервуара, связывается катионами металлов до наступления химического равновесия в растворе. Происходит постепенное насыщение раствора углекислым газом, и содержание CO_2 в составе свободных газов увеличивается. Этому процессу соответствует описанный линейный тренд в химическом составе свободных газов в грифонах, наблюдавшийся после землетрясения (рис. 3).

Массоперенос водогрязевой смеси в грифоне осуществляется преимущественно выделяющимся из грифона газом. Скорость течения водогрязевой смеси определяется интенсивностью дегазации в грифоне. Следовательно, при прочих равных условиях увеличение дебита газа в грифоне приводит к повышению скорости течения водогрязевой смеси в грифоне и появлению отрицательных температурных аномалий. Однако в некоторых грифонах водогрязевая смесь становится более густой. В этом случае существенное увеличение вязкости и плотности водогрязевой смеси, несмотря на увеличение дебита газа в грифоне, приводит к уменьшению скорости течения водогрязевой смеси и появлению положительных температурных аномалий.

В результате выполненных исследований выявлена связь вариаций дебита газа, элементного состава и температуры водогрязевой смеси в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана с сильными землетрясениями в регионе.

Потоки воды и газа в подводящем канале грязевого вулкана, а также вмещающие алюмосиликатные породы образуют специфическую геохи-

мическую систему. Происходит гидролиз алюмосиликатов с формированием вторичных минеральных фаз, которое может быть на большом расстоянии от исходных пород. Данная многокомпонентная система чувствительна к внешним воздействиям.

Описанные вариации объясняются взаимодействием в системе вода – порода – газ, являющейся подводящим каналом грязевого вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-05-64124) и ДВО РАН (грант № 09-III-B-08-483).

1. Алиев Ад. А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. – С. 35–51.

2. Алиев Ад. А., Гасанов А. Г., Байрамов А. А. Землетрясения и активизация грязевулканической деятельности (причинная связь и взаимодействие) // Труды Ин-та геологии НАНА. 2001. № 29. – С. 26–39.

3. Астахов А. С., Сергеев К. Ф., Мельников О. А. и др. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации // Докл. РАН. 2002. Т. 386. № 2. – С. 223–228.

4. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. – М.: Гостеол-издат, 1951. – 543 с.

5. 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.

6. Гасанов А. Г., Керамова Р. А. Связь сейсмичности, грязевого вулканизма, появления геохимических аномалий в подземных водах Каспийского региона // Отечеств. геология. 2005. № 1. – С. 69–72.

7. Гемп С. Д., Дуброва Н. В., Несмелова З. Н. и др. Изотопный состав углерода углеродсодержащих газов (CH₄ и CO₂) грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1970. № 2. – С. 243–247.

8. Еришов В. В. Грязевой вулканизм о. Сахалин и его связь с естественной сейсмичностью в регионе // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Первая региональная научно-техническая конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г.: Тез. докл. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. – С. 100.

9. Еришов В. В. Статистический анализ температурного режима грифонов Южно-Сахалинского грязевого (газоводолитокластитового) вулкана // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. II (XX) Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 4–10 июня 2007 г.: Сб. материалов. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – С. 268–284.

10. Еришов В. В., Гуринов М. Г. Исследования грязевого вулканизма о. Сахалин – проблемы и некоторые результаты // Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах. I (XIX) Междунар. конф. молодых ученых, Южно-Сахалинск, 15–20 июня 2006 г.: Сб. материалов. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. – С. 151–163.

11. Еришов В. В., Доманский А. В. Математическое моделирование температурного режима грифонов грязевых вулканов // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. IV Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 2–5 июня 2009 г.: Тез. докл. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. – С. 39–42.

12. Еришов 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 газоводолитокластитового (грязевого) вулкана // Докл. РАН. 2008. Т. 23. № 4. – С. 533–537.

13. Лаврушин В. Ю., Поляк Б. Г., Прасолов Э. М., Каменский И. Л. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 6. – С. 625–647.

14. Лагунова И. А. О генезисе CO₂ в газах грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1974. № 11. – С. 1711–1716.

15. Мельников О. А. Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект природы на Дальнем Востоке России. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. – 48 с.

16. Мельников О. А., Еришов В. В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се. Некоторые результаты мониторинга Южно-Сахалинского газоводолитокластитового вулкана летом 2005 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 4. – С. 66–72.

17. Мельников О. А., Еришов В. В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се. О динамике грифонной деятельности газоводолитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. – С. 25–41.

18. Осика Д. Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. – М.: Наука, 1981. – 204 с.

19. Ронов А. Б., Хлебникова З. В. Химический состав важнейших генетических типов глин // Геохимия. 1957. № 6. – С. 449–469.

20. Собисевич А. Л., Лаврова Н. И., Собисевич Л. Е. и др. Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. – М.: Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2005. – 225 с.

21. Сорочинская А. В., Шакиров Р. Б., Обжиров А. И. и др. Геохимические и минералогические особенности грязевых вулканов о. Сахалин // Вестник ДВО РАН. 2008. № 4. – С. 58–65.

22. Шакиров Р. Б., Еришов В. В. Изменчивость газогеохимических параметров грязевых вулканов о. Сахалин // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. III Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 3–6 июня 2008 г.: Сб. материалов. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. – С. 81–91.

23. Martinelli G., Dadomo A. Mud volcano monitoring and seismic events // Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity: Proc. of the NATO Advanced Research Workshop, Baku, Azerbaijan, 20–22 May, 2003. Dordrecht: Springer, 2005. – P. 187–199.

24. Yang T. F., Fu C. C., Walia V. et al. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: multi-parameter automatic gas monitoring results // Pure and applied geophys. 2006. Vol. 163. – P. 693–709.

Еришов Валерий Валерьевич – науч. сотрудник, ИМГиГ ДВО РАН. <erшов@imgg.ru>.

Шакиров Ренат Белалович – канд. г.-м. наук, ст. науч. сотрудник, Тихоокеан. океанолог. ин-т им. В. И. Ильичева ДВО РАН. <ren@poi.dvo.ru>.

Мельников Олег Александрович – канд. г.-м. наук, вед. науч. сотрудник, ИМГиГ ДВО РАН. <islandarc@imgg.ru>.

Копанина Анна Владимировна – канд. биол. наук, ученый секретарь, ИМГиГ ДВО РАН. <avk@imgg.ru>.