

На правах рукописи



Ершов Валерий Валерьевич

**ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ И ИХ СВЯЗЬ
С РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ
(НА ПРИМЕРЕ О-ВА САХАЛИН)**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Богомолов Леонид Михайлович
кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Оппоненты:

Каракин Андрей Владимирович
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научный центр Российской Федерации ВНИИгеосистем

Собисевич Алексей Леонидович
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 19 » декабря 2013 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук

Автореферат разослан « ____ » ноября 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

 В.А. Рыбаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Грязевые вулканы представляют собой природные флюидодинамические системы, в которых протекают процессы интенсивного переноса энергии и вещества из недр Земли на ее поверхность. При изучении грязевого вулканизма традиционно рассматривается ряд важных проблем, имеющих прикладное и фундаментальное значение. К ним относятся, в частности, связь грязевого вулканизма с нефтегазоносностью земных недр, влияние грязевых вулканов на баланс парниковых газов в атмосфере, процессы образования скоплений газогидратов в грязевых вулканах и др.

Катастрофические извержения грязевых вулканов могут оказывать существенное воздействие на окружающую среду. Так, например, извержение грязевого вулкана LUSI (о-в Ява, Индонезия) в мае 2006 г. заставило десятки тысяч людей сменить свое местожительство. Фаза бурного извержения с переменной активностью продолжалась более двух лет. Экономический ущерб от извержения оценивается миллиардами долларов США. Кроме того, многие подводные грязевые вулканы располагаются на континентальном шельфе, поэтому даже слабые извержения могут вызывать разрушения прибрежной инфраструктуры (например, нефтегазопроводов), а также затруднять навигацию в прибрежных водах. В связи с этим крайне важно иметь корректные количественные оценки пространственно-временных масштабов деятельности грязевых вулканов. Актуальность рассматриваемой проблематики обусловила проведение данного исследования в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Несмотря на большое число отечественных и зарубежных публикаций вопросы о механизме деятельности грязевых вулканов, о количественном описании процессов грязевого вулканизма, об особенностях связи грязевого вулканизма с сейсмичностью остаются открытыми и требуют дальнейших исследований.

Большинство участков проявления грязевого вулканизма приурочены к сейсмически активным регионам, причем вопрос о взаимосвязи деятельности грязевых вулканов с землетрясениями пока не выяснен однозначно. В некоторых работах считается, что различные характеристики грязевулканической деятельности являются индикаторами (предвестниками) готовящихся землетрясений. С другой стороны, высказывается и мнение о том, что сильные землетрясения запускают

извержения грязевых вулканов. Например, в качестве одной из причин извержения вулкана LUSI рассматривается землетрясение с магнитудой $M = 6.3$, которое произошло незадолго до извержения на расстоянии около 250 км от вулкана.

На Дальнем Востоке России о-в Сахалин является единственным регионом, где известны наземные грязевые вулканы. Наличие на о-ве Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, высокая современная сеймотектоническая активность региона, сложные системы разрывных нарушений делают этот регион уникальным полигоном для изучения грязевого вулканизма.

Цель работы: определить закономерности разгрузки геофлюидов в грязевых вулканах о-ва Сахалин и ее связи с сейсмичностью в регионе на основе данных натуральных наблюдений и математического моделирования.

Задачи работы:

1. Проведение мониторинговых наблюдений за температурой водогрязевой смеси, дебитом, химическим и изотопным составом свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана и статистический анализ результатов.

2. Математическое описание флюидодинамических процессов, протекающих в грязевых вулканах: миграции геофлюидов при подготовке извержения вулкана и теплопереноса в грифонах вулкана.

3. Оценка глубины залегания источника газа и корней грязевых вулканов о-ва Сахалин по данным натуральных исследований и математического моделирования.

4. Исследование связи между деятельностью грязевых вулканов о-ва Сахалин и сейсмическими событиями в регионе.

Защищаемые положения:

1. Фоновый режим разгрузки геофлюидов Южно-Сахалинского грязевого вулкана характеризуется стабильностью дебита и химического состава свободных газов, а также высоким коэффициентом корреляции ($r = 0.7 \div 0.8$) между температурой в грифонах вулкана и температурой воздуха.

2. Предложена математическая модель процесса подготовки извержения грязевого вулкана, включающая уравнения нестационарной фильтрации жидкости и газа. Модельными расчетами показано, что при периоде извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана около 20 лет питающая вулкан газовая залежь находится на глубине 8 – 12 км.

3. На основе нестационарного уравнения теплопроводности с конвективным слагаемым предложена математическая модель тепловых процессов при течении геофлюидов по грифонному каналу, которая адекватно описывает вариации температуры в грифонах грязевого вулкана. Показано, что изменения температурного режима грифонов обусловлены изменениями скорости течения геофлюидов.

4. Инструментально установлены статистически значимые аномалии температуры водогрязевой смеси, дебита и химического состава свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана при сейсмической активизации на юге о-ва Сахалин.

Научная новизна. Впервые выполнены комплексные наблюдения за температурой водогрязевой смеси, дебитом, химическим и изотопным составом свободных газов, осуществленные для большого числа грифонов. Ранее проводились или кратковременные наблюдения, или наблюдения для небольшого числа грифонов, или мониторинг какого-то одного параметра. Предложена математическая модель подготовки извержений грязевых вулканов на основе нестационарных уравнений механики сплошных сред. Ранее предлагались или стационарные модели, или модели непосредственно самого процесса извержения. Моделирование выполнено с учетом зависимости свойств геофлюидов от глубины. По данным математического моделирования получено однозначное решение обратной задачи по определению глубины залегания источника газа и корней грязевых вулканов. В предшествующих моделях обратная задача или не рассматривалась вообще, или имела неоднозначное решение. Впервые предложена математическая модель температурного режима грифонов грязевых вулканов. Инструментально установлены статистически значимые аномалии температуры водогрязевой смеси, дебита и химического состава свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана при сейсмической активизации на юге о-ва Сахалин. До этого наличие такой связи упоминалось лишь на основе редких визуальных осмотров вулкана.

Личный вклад. Диссертант принимал непосредственное участие во всех этапах диссертационного исследования, им написано более 2/3 объема публикаций по теме диссертации и сделаны выводы. Диссертант проводил полевые работы на Южно-Сахалинском и Главном Пугачевском грязевых вулканах в 2005-2009 гг., а также обработку и анализ полученных натуральных данных. Диссертант принимал непосредственное

участие в разработке математической модели подготовки извержения грязевого вулкана. Диссертантом разработана математическая модель температурного режима грифонов грязевого вулкана. Требующиеся модельные расчеты выполнены диссертантом лично. Диссертантом предложена интерпретация наблюдаемых после землетрясений аномалий температуры водогрязевой смеси, дебита и химического состава свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

Мониторинговые наблюдения 2005-2007 гг. за грифоновой деятельностью Южно-Сахалинского грязевого вулкана проведены в рамках гранта РФФИ (№ 05-05-64124), в котором диссертант был основным исполнителем. Математическое моделирование температурного режима грифонов грязевого вулкана выполнено в рамках грантов ДВО РАН (№ 09-III-B-08-483, 10-III-B-08-222 и 11-III-B-08-214), в которых диссертант являлся руководителем.

Практическая значимость. Получены количественные оценки для пространственно-временных характеристик деятельности грязевых вулканов. На основе предложенной математической модели подготовки извержения грязевого вулкана могут быть сделаны оценки периода извержения, распределения давления в подводящем канале, глубины залегания источника газа и корней грязевых вулканов. Такие оценки необходимо знать при ведении хозяйственной деятельности в районах проявления грязевого вулканизма – при бурении, прокладке кабельных каналов связи, нефтегазопроводов. Результаты наблюдений за дебитом и химическим составом свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана могут быть использованы для оценки интенсивности поставки парниковых газов из грязевых вулканов в атмосферу.

Результаты проведенного статистического анализа температурного режима грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана, а также разработанная соответствующая математическая модель, являются методической основой для организации непрерывных дистанционных наблюдений (телеметрии) за температурой в грифонах грязевых вулканов. Измеренные при этих наблюдениях значения температуры водогрязевой смеси могут оперативно сопоставляться с теоретически рассчитанными значениями. Это позволит в режиме реального времени отслеживать аномалии температурного режима и общую степень активности грязевых вулканов. Подобные наблюдения необходимы для выявления процессов подготовки извержений грязевых вулканов, а также для определения

изменений в деятельности вулканов, обусловленных сейсмической активизацией в регионе. В перспективе результаты исследований флюидодинамических процессов в грязевулканических структурах могут быть использованы как основа для создания одного из элементов комплексного (интегрального) предвестника землетрясений.

Апробация. Результаты работы докладывались на Седьмых и Восьмых геофизических чтениях им. В.В. Федынского (г. Москва, 2005 и 2006 гг.), на XXXVII научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Сахалинского государственного университета (г. Южно-Сахалинск, 2006 г.), на I, II, III, IV и V Сахалинских молодежных научных школах «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (г. Южно-Сахалинск, 2006-2010 гг.), на Первой региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (г. Петропавловск-Камчатский, 2007 г.), на Всероссийской конференции «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы» (г. Москва, 2008 г.), на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), на Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (г. Владивосток, 2010 г.), на Всероссийской конференции «Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ, углеводороды и жизнь» (г. Москва, 2010 г.), на Второй молодежной тектонофизической школе-семинаре (г. Москва, 2011 г.), на VII Косыгинских чтениях «Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии» (г. Хабаровск, 2011 г.). Основные результаты работы докладывались на научных семинарах в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток, 2010 г.), Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва, 2010 г.) и Институте динамики геосфер РАН (г. Москва, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 26 научных работ, в том числе 1 монография, 13 статей в рецензируемых журналах (из них 12 в журналах из перечня ВАК), 12 статей в научных сборниках и трудах конференций.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 214 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок, 7 таблиц и библиографический список из 231 наименования.

Благодарности. Автор глубоко признателен директору ИМГиГ ДВО РАН чл.-корр. РАН Б.В. Левину за поддержку в организации работ по изучению грязевого вулканизма о-ва Сахалин, д.г.-м.н. Т.К. Злобину за помощь и полезные советы на всех этапах диссертационного исследования, а также своему научному руководителю к.ф.-м.н. Л.М. Богомолу. Особую благодарность автор выражает сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН к.г.-м.н. О.А. Мельникову и д.ф.-м.н. А.В. Доманскому, которые сыграли значительную роль в становлении научных взглядов автора. Под началом Олега Александровича автор делал первые шаги в изучении грязевого вулканизма. Андрей Владимирович оказал большую помощь в математическом описании грязевулканических процессов.

Автор благодарен за помощь и внимание к своей работе сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН к.ф.-м.н. А.В. Коновалову, к.г.-м.н. В.Н. Патрикееву, к.г.-м.н. В.В. Жигулеву, к.ф.-м.н. Ким Чун Уну, к.ф.-м.н. Д.А. Сафонову. За постоянную поддержку при написании работы, а также ценные советы и замечания автор с большим удовольствием благодарит свою супругу и ученого секретаря ИМГиГ ДВО РАН к.б.н. А.В. Копанину. Автор также признателен сотруднику ТОИ ДВО РАН к.г.-м.н. Р.Б. Шакирову, с которым успешно сотрудничает на протяжении многих лет.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов. Приведены также сведения о личном вкладе автора и апробации результатов диссертационной работы.

В **главе 1** «Общая характеристика проявлений грязевого вулканизма на Земле» рассмотрены закономерности пространственного распределения грязевых вулканов, основные концепции происхождения и деятельности грязевых вулканов, геохимическая характеристика продуктов грязевого вулканизма, вопросы связи между грязевым вулканизмом и региональной сейсмичностью. Отдельно рассмотрены геологическое строение, хронология извержений и вещественный состав продуктов деятельности грязевых вулканов о-ва Сахалин. Грязевые вулканы этого региона характеризуются более слабой изученностью по сравнению с вулканами многих других грязевулканических провинций мира. Сделан также обзор существующих математических моделей, описывающих деятельность грязевых вулканов. Вопросы математического описания грязевулканических

процессов пока разработаны довольно слабо, что затрудняет корректную интерпретацию получаемых эмпирических данных.

В **главе 2** «Методика исследований флюидодинамических процессов, протекающих в грязевых вулканах» рассмотрены методические аспекты исследований динамики геофлюидов в грязевых вулканах. В работе применяется комплексный подход, предполагающий использование совокупности различных методов. Экспериментальные исследования включают в себя мониторинговые наблюдения за температурой водогрязевой смеси и дебитом свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана, а также отбор и дальнейший химический и изотопный анализ проб свободных газов. Для анализа данных натуральных наблюдений используются методы математической статистики. Теоретические исследования включают в себя математическое моделирование флюидодинамических процессов – миграцию геофлюидов при подготовке извержения вулкана и теплоперенос в грифонных каналах вулкана. При этом используются методы численного расчета и построения точных решений соответствующих начально-краевых задач математической физики. При моделировании учитывается зависимость свойств геофлюидов от термобарических условий, то есть от глубины.

В **главе 3** «Регулярные наблюдения за разгрузкой флюидов на Южно-Сахалинском грязевом вулкане» приведены результаты натуральных наблюдений за деятельностью Южно-Сахалинского вулкана, выполненных в полевые сезоны 2005-2009 гг. Эти наблюдения позволили определить основные закономерности грифонной деятельности вулкана [4, 14].

Параметры грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана – температура водогрязевой смеси, дебит и химический состав свободных газов – статистически значимо различаются для разных грифонов. В то же время изотопный состав углерода метана и углекислого газа в составе свободных газов практически одинаков для разных грифонов, то есть газ во все грифоны поступает из одного и того же источника.

Установлено, что вариации наблюдаемых параметров для некоторых грифонов грязевого вулкана могут сильно отличаться от вариаций этих же параметров для большинства грифонов. В связи с этим для изучения общих закономерностей грифонной деятельности измерения необходимо проводить для большого количества грифонов вулкана.

Наблюдения проводились в основном в летнее время года. Для этого периода времени температура в активных грифонах вулкана имеет

относительно низкие и слабо изменяющиеся значения. Для пассивных грифонов имеет место обратная закономерность. Под активным грифоном понимается грифон, из которого за единицу времени истекает относительно большой объем водогрязевой смеси и свободных газов.

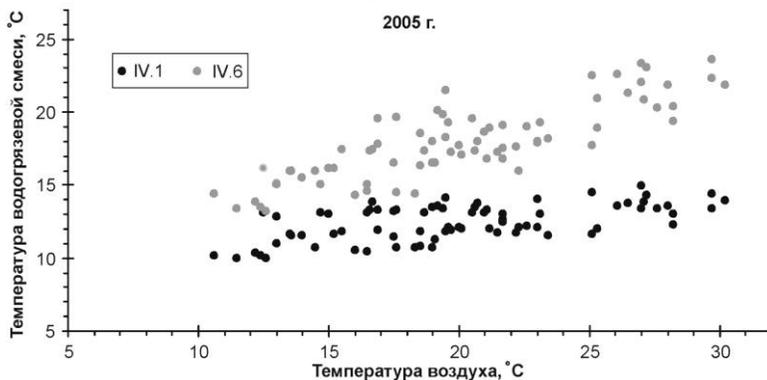


Рис. 1. Пример диаграммы рассеяния для температуры воздуха и температуры в активном грифоне IV.1 и пассивном грифоне IV.6.

Между температурой в грифоне и температурой воздуха существует сильная корреляционная связь (рис. 1). Для улучшения качества регрессии нужно учитывать тепловую инерцию грифона, что можно сделать с помощью такого параметра как температура поверхности грязевого поля. При регрессионном анализе использовалась статистическая модель вида: $T_{cp} = f(T_a, T_n) + \varepsilon = k_1 T_a + k_2 T_n + k_3 + \varepsilon$, где T_{cp} – температура водогрязевой смеси, $f(T_a, T_n)$ – детерминированная составляющая, T_a – температура окружающего воздуха, T_n – температура поверхности грязевого поля, ε – случайная величина, имеющая нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией. Эта регрессия позволяет объяснить до 95 % (иногда и больше) дисперсии температуры водогрязевой смеси в грифонах. Значительные отклонения от указанной линейной зависимости следует рассматривать как изменения в деятельности грифона, о которых можно судить по остаткам, полученным после удаления детерминированной составляющей.

Таким образом, по итогам регулярных наблюдений, проведенных нами в условиях различной сейсмической активности юга о-ва Сахалин, установлены характерные особенности грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана при отсутствии воздействия на вулкан

эндогенных факторов (в частности, землетрясений). Такие данные необходимы для обоснованного выделения аномалий грязевулканической деятельности, обусловленных сильными землетрясениями.

В главе 4 «Математическое моделирование неустановившихся течений геофлюидов в грязевулканических структурах» выполнено математическое описание миграции геофлюидов в грязевулканических структурах при подготовке извержения вулкана [7, 11]. В модели считается, что подводящим каналом грязевого вулкана является разлом, выходящий на дневную поверхность (рис. 2). В области разлома из перекрывающих осадочных толщ образуется слой водогрязевой смеси (брекчии), который подпирается снизу газом, истекающим из питающей грязевой вулкан газовой залежи. С ростом давления газа происходит вытеснение газом брекчии из канала до момента извержения вулкана, при котором происходит сброс давления газа. После этого пути миграции глубинного газа снова перекрываются брекчией, и происходит подготовка нового извержения вулкана. Считается, что мощность тела вулкана гораздо меньше глубины залегания канала вулкана: $L > H \gg Z$.

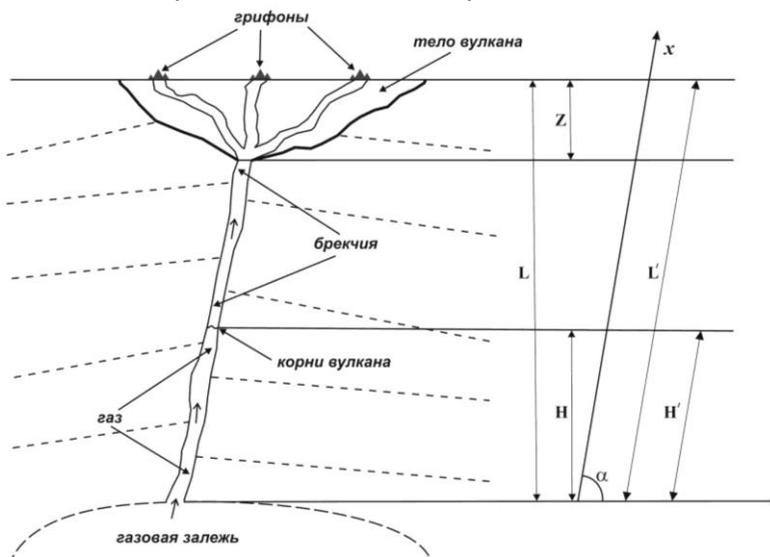


Рис. 2. Схема грязевого вулкана: α — угол падения разлома, Z — мощность тела вулкана, L , L' — глубина залегания и длина подводящего канала вулкана, $L' - H'$ — длина слоя грязевулканической брекчии в канале, $L - H$ — глубина залегания корней вулкана.

На участке между водогазевой толщей и источником газа происходит фильтрация газа, которая описывается с помощью уравнения неразрывности газа, закона Дарси и уравнения состояния реального газа:

$$m \frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_z \vec{v}_z) = 0, \quad \vec{v}_z = -\frac{k}{\mu_z} (\nabla p_z + \rho_z \vec{g}), \quad \rho_z = \frac{\rho_0}{p_0} \frac{T_0}{zT} p_z.$$

Здесь m , k – пористость и проницаемость подводящего канала, ρ_z , v_z , μ_z , p_z , z и T – плотность, скорость, вязкость, давление, коэффициент сжимаемости и температура газа, g – ускорение свободного падения, $p_0 = 0.101325$ МПа, $T_0 = 273.15$ К, ρ_0 – плотность газа при p_0 и T_0 . Фильтрационное течение рассматривается в одномерном приближении. Коэффициент сжимаемости и вязкость газа зависят от температуры и давления, то есть определяются глубиной залегания источника газа.

Система уравнений после преобразований сводится к нелинейному уравнению фильтрации газа, которое является по сути уравнением Лейбензона для ламинарной фильтрации в неизменяемой пористой среде:

$$\frac{\partial p_z}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu_z} \frac{\partial^2 p_z^2}{\partial x^2} + \frac{k\rho_0 T_0 g \sin \alpha}{m\mu_z p_0 zT} \frac{\partial p_z^2}{\partial x}.$$

После линеаризации и обезразмеривания получаем линейное однородное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\sigma \frac{\partial u}{\partial x},$$

где $u = p_z^2$ – квадрат давления газа, $\sigma = (\rho_0 T_0 g H) / (p_0 z T)$ – некоторый безразмерный параметр, x и t – безразмерные координата и время. На входной границе канала вулкана задается давление в источнике газа, на границе между водогазевой толщей и газом задается нулевой поток газа:

$$u(0, t) = u_0 = p_{nl}^2 = \text{const}, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(1, t) + 2\sigma u(1, t) = 0, \quad u(x, 0) = 0.$$

Решая поставленную начально-краевую задачу методом разделения переменных, получим распределение давления газа в канале вулкана:

$$\frac{p_z}{p_{nl}} = e^{-\sigma x} \sqrt{1 - 2e^{\sigma(x-t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\gamma_k}{\sigma + \sigma^2 + \gamma_k^2} e^{-\gamma_k^2 t / \sigma} \sin \gamma_k x} \equiv \Phi_0(\sigma, x, t).$$

Здесь $\operatorname{tg} \gamma_k = -\gamma_k / \sigma$, $p_{nl} = \rho_{nl} g L$ – пластовое давление в газовой залежи, ρ_{nl} – плотность пластовых пород. Показано, что для любого момента

времени существует только одно значение σ , при котором функция $\Phi(\sigma, t) \equiv \sigma \Phi_0(\sigma, 1, t)$ имеет максимум. Это свойство функции $\Phi(\sigma, t)$ обуславливает однозначность решения обратной задачи.

В верхней части подводящего канала вулкана происходит вытеснение газом водогрязевой смеси. Этот процесс можно описать в рамках модели двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей с учетом капиллярных сил, которая в одномерной постановке имеет вид:

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

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

Здесь $v_z, v_{z1}, \mu_z, \mu_{z1}, f_z, f_{z1}, p_z, p_{z1}, \rho_z, \rho_{z1}$ – соответственно скорость фильтрации, вязкость, относительная фазовая проницаемость, давление и плотность газовой и жидкой фазы, $p_\kappa = \varphi(s) p_\kappa^0$ – капиллярное давление, $\varphi(s)$ – функция Леверетта, $s_0 \leq s \leq s^0$ – газонасыщенность, s_0, s^0 – остаточные насыщенности, $p_\kappa^0 = \sqrt{m/k} \gamma \cos \theta$ – характерное капиллярное давление, γ – коэффициент поверхностного натяжения, θ – краевой угол смачивания. На границе между газом и брекчией задается нулевой поток водогрязевой смеси. Давление p_H на этой границе задается из стационарного решения прямой задачи фильтрации газа. Давление на выходе из канала вулкана считается равным атмосферному давлению p_A :

$$x = H' : v_{z1} = 0, p_z = p_H, \quad x = L' : p_z = p_{z1} = p_A, \quad t = 0 : s = s_0.$$

Данная начально-краевая задача решалась методом конечных разностей. Согласно расчетам доля водогрязевой смеси, остающейся в канале, составляет около 80 % трещиновато-пористого пространства канала. Отношение вязкостей брекchieй и газа μ_z/μ_{z1} является одним из основных параметров, влияющих на длительность и полноту вытеснения.

В соответствии с литературными данными о грязевом вулканизме мира характерный пространственный масштаб модели составляет единицы километров, характерный временной масштаб – единицы/десятки лет. В рамках модели сформулирована обратная задача по определению глубины залегания источника газа и корней грязевого вулкана и получено ее однозначное решение. Сделана оценка влияния, которое оказывает на решение обратной задачи неопределенность в значениях параметров

модели (рис. 3). Основными параметрами, определяющими результат решения обратной задачи, является проницаемость канала и химический состав грязевулканических газов. Геотермический градиент в окрестностях вулкана и период извержений вулкана и влияют меньше. Результаты решения обратной задачи для Южно-Сахалинского грязевого вулкана согласуются с данными по изотопному составу газов этого вулкана.

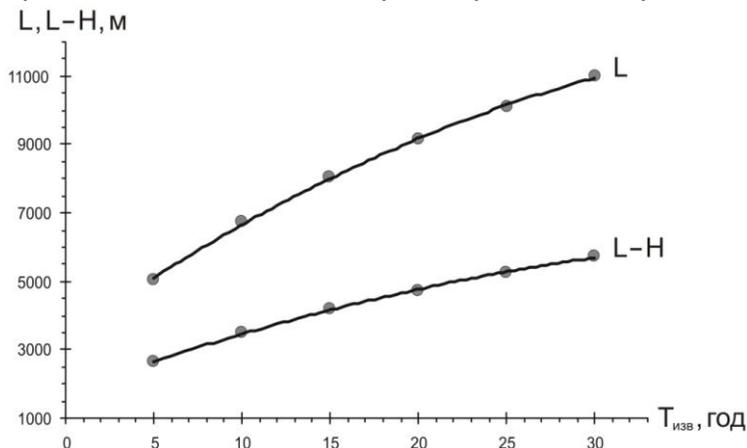


Рис. 3. Зависимость решения обратной задачи для Южно-Сахалинского грязевого вулкана от периода извержений вулкана.

В главе 5 «Математическое моделирование температурного режима грифонов грязевого вулкана» выполнено математическое описание вариаций температуры в грифонах грязевых вулканов [8]. В отличие от модели, рассмотренной в предыдущей главе, характерный пространственный масштаб составляет здесь десятки метров, а характерный временной масштаб – десятки суток. В модели считается, что в теле вулкана образуются трещины (например, из-за гидроразрыва), которые служат каналами для грифонов (рис. 4). По каналу движется вверх с некоторой скоростью водогазовая смесь, считающаяся идеальной несжимаемой жидкостью. Считается также, что теплообмен между жидкостью в канале и окружающей средой происходит в основном на концах канала.

С учетом сделанных предположений распределение температуры водогазовой смеси в грифонном канале будет удовлетворять одномерному нестационарному уравнению теплопроводности с конвективным слагаемым:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial T}{\partial x},$$

где T , a , ν – температура, температуропроводность и скорость течения водогрязевой смеси. Конвективный перенос тепла обусловлен течением смеси, вызванным градиентом давления в грифонном канале. Кроме того, массоперенос жидкости в канале осуществляется поднимающимися пузырьками свободных газов (например, посредством газлифта). Эти же пузырьки перемешивают водогрязевую смесь, что также вносит свой вклад в конвективную составляющую теплопереноса. Поэтому величина ν в модели – это некоторая эффективная скорость, которая будет несколько выше реальной скорости течения водогрязевой смеси в канале. Очевидно, что величина ν связана обратной зависимостью с вязкостью жидкости.

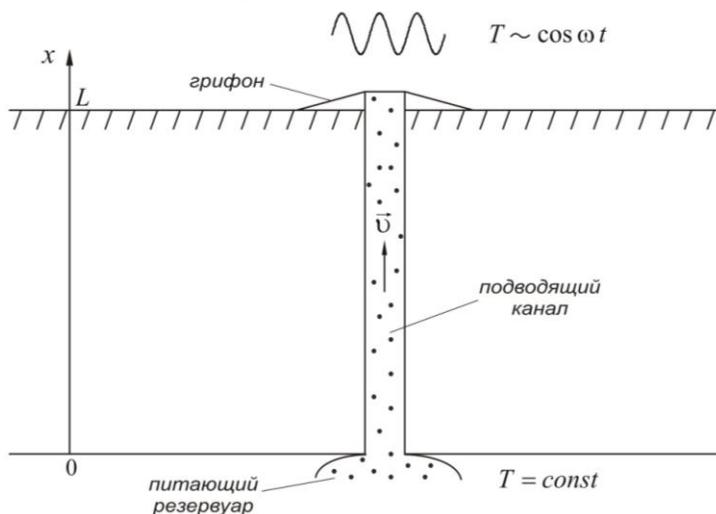


Рис. 4. Схематический разрез приповерхностной части грязевого вулкана: L – длина грифонного канала, а также глубина залегания пояса постоянных температур, ω – частота колебаний температуры воздуха.

Температура водогрязевой смеси на нижнем конце канала считалась постоянной и соответствующей температуре T_0 вмещающих пород на глубине залегания пояса постоянных температур. Температура смеси на верхнем конце канала считалась равной суперпозиции годовых и суточных колебаний температуры воздуха:

$$T(x, 0) = T_0, \quad T(0, t) = T_0, \quad T(L, t) = T_{m1} \cos(\omega_1 t - \varphi_{01}) + T_{m2} \cos(\omega_2 t - \varphi_{02}),$$

где T_{m1} , T_{m2} , ω_1 , ω_2 , φ_{01} , φ_{02} – амплитуда, циклическая частота и начальная фаза годовых и суточных колебаний.

После обезразмеривания и приведения к однородным граничным условиям методом разделения переменных получено аналитическое решение поставленной начально-краевой задачи. Это решение представляет собой ряд, который довольно медленно сходится. Поэтому с помощью метода конечных разностей получено численное решение этой задачи. Для расчетов применялась неявная разностная схема с центральной аппроксимацией младшей производной в используемом уравнении. Посредством сопоставления численного и аналитического решений выбраны оптимальные значения шагов по координате и времени для разностной схемы.

Из модельных расчетов следует, что колебания температуры водогрязевой смеси в грифоне быстро (по отношению к периоду грифонной деятельности вулкана) выходят на установившийся режим. Решения с различными начальными условиями быстро выходят на один и тот же колебательный режим. Причем, чем выше скорость течения водогрязевой смеси, тем быстрее решение «забывает» начальное условие. Показано, что чем меньше скорость движения водогрязевой смеси в грифонном канале, тем на большую глубину проникают в канал колебания температуры воздуха. Для активных грифонов, начиная уже с достаточно небольшой глубины, температура водогрязевой смеси почти не изменяется со временем, а градиент температуры в канале близок к нулю. Отсюда следует, что измерения температуры в верхней части канала являются более информативными для определения изменений гидродинамических характеристик течений водогрязевой смеси в грифонах вулкана.

Моделирование показало, что основным параметром, определяющим различия температурного режима для разных грифонов, является скорость течения водогрязевой смеси в грифонном канале. Результаты моделирования хорошо согласуются с натурными данными. В частности, модельные расчеты показывают, что в летнее время года температура в активных грифонах будет ниже, чем в пассивных грифонах. Из расчетов также следует, что для активных грифонов диапазон вариаций температуры водогрязевой смеси будет меньше, чем для пассивных грифонов.

В главе 6 «Проявления региональной сейсмичности в деятельности грязевых вулканов о-ва Сахалин» приведены результаты исследований влияния землетрясений на деятельность грязевых вулканов о-ва Сахалин. Результаты анализа имеющихся данных о землетрясениях и извержениях грязевых вулканов о-ва Сахалин за 1905-2005 гг. не позволяют говорить о наличии связи между ними. Извержения грязевого вулкана происходят,

прежде всего, в силу его собственной деятельности, а землетрясения следует считать лишь одним из вспомогательных факторов. Подготовка извержения грязевого вулкана занимает вполне определенный промежуток времени, который зависит от геометрии канала и физических свойств газа и водогрязевой смеси. Отсюда следует, что для изучения связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью необходимы режимные наблюдения за грифоновой деятельностью грязевых вулканов.

Впервые инструментально установлены статистически значимые изменения в грифоновой деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана при сейсмической активизации в регионе – Горнозаводского землетрясения 17 (18) августа 2006 г. с магнитудой $M = 5.6$ и Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. с магнитудой $M = 6.2$ [6, 10, 12]. Расстояние до вулкана составило 85 и 65 км соответственно.

Во время наших наблюдений проводился ежедневный визуальный осмотр всех грифонов. Установлено, что после землетрясений в некоторых активных грифонах произошло изменение консистенции водогрязевой смеси вплоть до очень густой и вязкой массы. Для таких грифонов после землетрясений значительно уменьшилось количество изливаемой водогрязевой смеси. Описанные эффекты постепенно «затухали» в течение интервала времени от нескольких дней до нескольких недель.

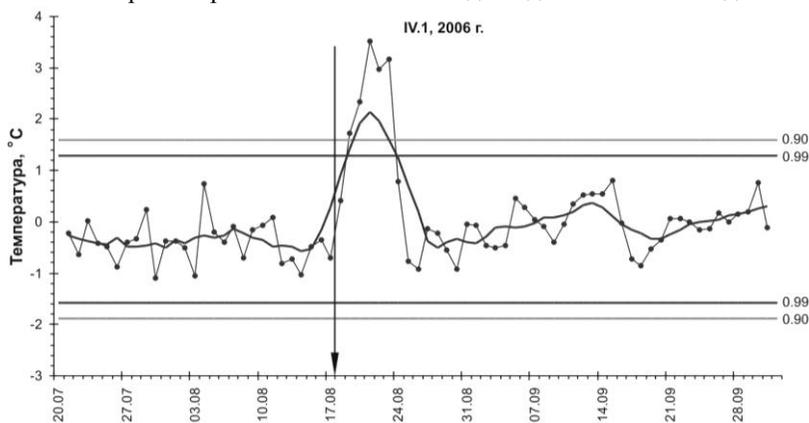


Рис. 5. Пример положительной температурной аномалии в грифоне IV.1 после Горнозаводского землетрясения. Тренд выделен методом скользящего среднего. Доверительный интервал для вероятности 0.99 построен из предположения о нормальности распределения остатков, интервал для вероятности 0.90 построен с помощью неравенства Чебышева.

После землетрясений в грифонах наблюдались положительные и отрицательные аномалии температуры водогрязевой смеси, которые хорошо видны в остатках, полученных после удаления линейной регрессии на температуру воздуха (рис. 5). Положительные аномалии возникали в активных грифонах, отрицательные – в пассивных грифонах.

После указанных землетрясений во многих грифонах произошло увеличение в несколько раз дебита свободных газов (рис. 6). Произошло также изменение химического состава газов – понижение доли углекислого газа и повышение доли метана (рис. 7). В то же время изотопный состав углерода углекислого газа и метана остался неизменным.

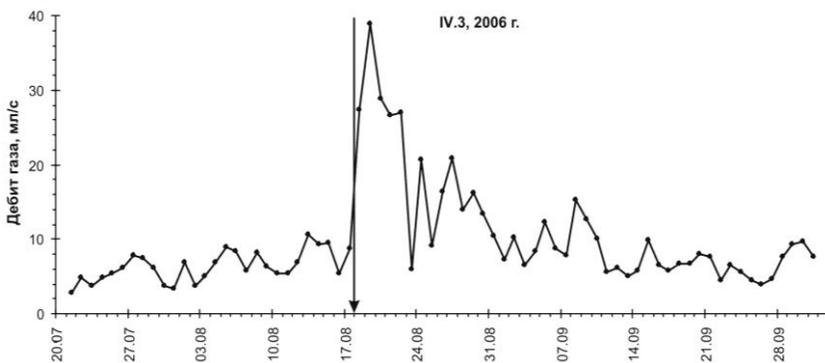


Рис. 6. Пример увеличения дебита свободных газов в грифоне IV.3 после Горнозаводского землетрясения.

Описанные проявления землетрясений в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана наблюдались одновременно и похожим образом сразу во многих грифонах. Это свидетельствует о закономерности таких проявлений.

Предложена возможная интерпретация аномалий, наблюдаемых после землетрясений. Здесь не требуется привлечения гипотезы о дополнительном подтоке глубинных геофлюидов, которая часто используется при объяснении влияния эндогенных процессов на деятельность флюидодинамических систем. В нашем случае эта гипотеза противоречит натурным данным – неизменности изотопного состава грязевулканических газов, наличию отрицательных аномалий температуры в грифонах и др.

Количество растворенного в жидкости газа пропорционально давлению газа. Сейсмическая волна от землетрясения, проходя через грязевулканическую структуру, может вызывать изменение давления в

канале вулкана, что способствует переходу части растворенного газа в свободную фазу. Это приводит к увеличению дебита свободных газов в грифонах. Изменение при этом соотношения между углекислым газом и метаном в составе свободных газов обусловлено различным характером зависимости растворимости этих газов от давления. Снижение концентрации растворенного углекислого газа приводит к смещению химического равновесия в растворе и выпадению в осадок некоторых минералов. Известно, что вязкость дисперсных систем растет по мере возрастания дисперсной фазы, то есть водогрязевая смесь становится более вязкой.

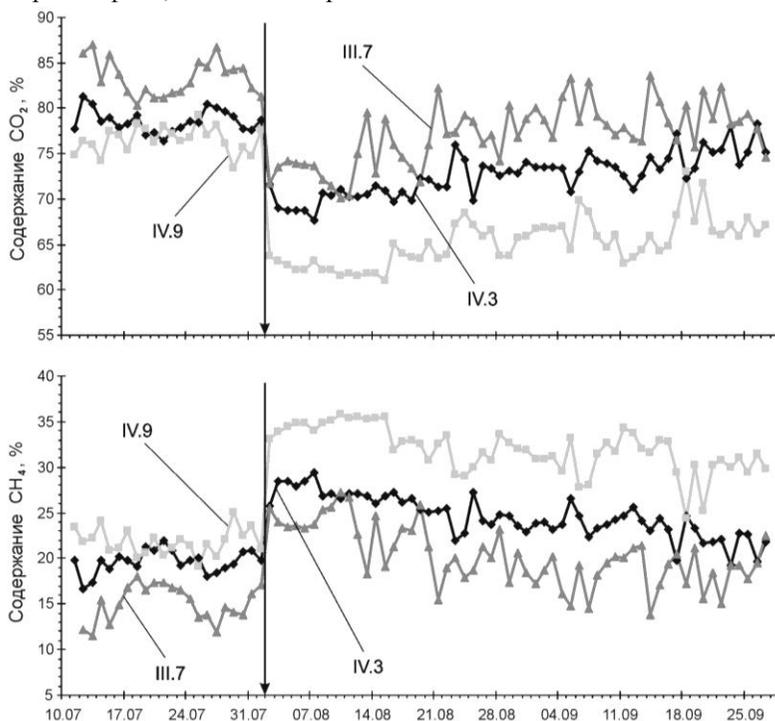


Рис. 7. Вариации химического состава свободных газов в грифонах III.7, IV.3 и IV.9 с указанием даты Невельского землетрясения.

С помощью математического моделирования показано, что anomalous changes in temperature in the gryfons are caused by variations in the flow rate of the mud-water mixture in the gryfon channels. An increase in the flow rate leads to the appearance of negative temperature anomalies, and a decrease in the flow rate – to the appearance of positive anomalies (fig. 8).

При прочих равных условиях увеличение дебита свободных газов в грифоне приводит к повышению эффективной скорости течения водогрязевой смеси, которая характеризует конвективную составляющую теплопереноса. В ряде случаев значительное увеличение вязкости смеси, несмотря на увеличение интенсивности дегазации в грифонах, вызывает понижение эффективной скорости течения смеси.

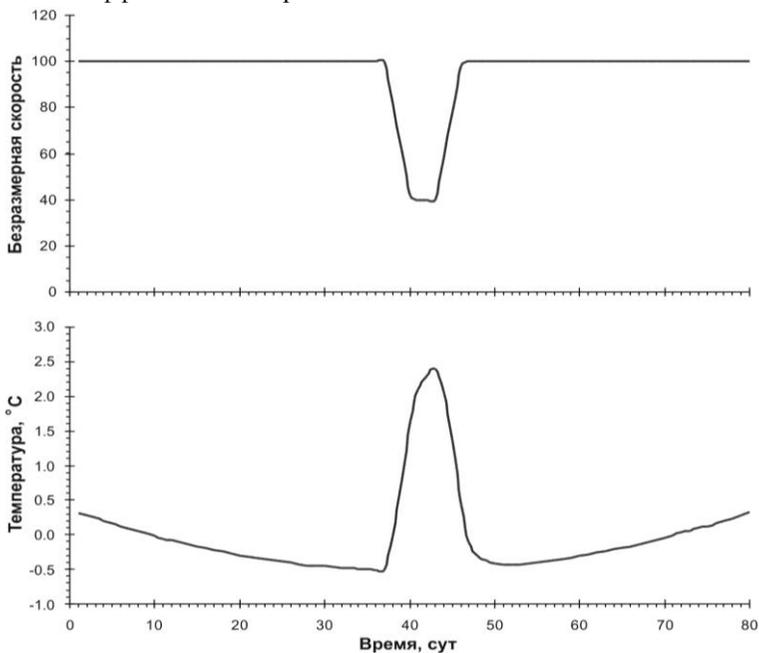


Рис. 8. Изменения скорости движения водогрязевой смеси и остатки для температуры в грифоне, полученные из модельных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые могут быть кратко сформулированы следующим образом:

1. При статистическом анализе полученных нами данных о температуре водогрязевой смеси, дебите, химическом и изотопном составе свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана выявлены основные закономерности разгрузки грязевулканических флюидов. В условиях низкой сейсмической активности в регионе для большинства грифонов вулкана характерна довольно слабая

изменчивость дебита и химического состава свободных газов. Между температурой в грифонах и температурой воздуха существует сильная корреляционная связь, нарушения которой следует рассматривать как аномалии.

2. На основе нестационарных уравнений фильтрации газа и двухфазной фильтрации газа и водогрязевой смеси предложена математическая модель, позволяющая описать процесс подготовки извержения грязевого вулкана и решить обратную задачу по определению глубины залегания источника газа и корней грязевого вулкана. Из модельных расчетов следует, что при среднем периоде извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана около 20 лет газовая залежь, питающая данный вулкан, находится на глубине 8 – 12 км.
3. Для описания температурного режима грифонов грязевого вулкана предложена математическая модель переноса тепла в грифонном канале, основанная на нестационарном уравнении теплопроводности с конвективным слагаемым. Показано, что основным параметром, определяющим различия температуры в разных грифонах, является скорость течения водогрязевой смеси в грифонном канале. В летнее время года температура и диапазон ее вариаций будет меньше в грифонах с относительно высокой скоростью течения водогрязевой смеси. Изменения скорости течения водогрязевой смеси вызывают нетипичные вариации температуры в грифоне.
4. Инструментально установлено влияние сильных сейсмических событий на юге о-ва Сахалин на грифонную деятельность Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В первые сутки после Горнозаводского и Невельского землетрясений в грифонах вулкана наблюдаются положительные и отрицательные аномалии температуры (интенсивностью 2 – 5 °С), повышение дебита свободных газов (в 2 – 5 раз), увеличение доли метана в составе свободных газов (в 1.4 – 1.6 раза). Наблюдаемые аномалии можно объяснить взаимодействием «вода–порода–газ» в верхней части подводящего канала вулкана без привлечения гипотезы о дополнительном притоке глубинных геофлюидов. Таким образом, показано, что в каналах грязевых вулканов протекают специфические флюидодинамические процессы, которые необходимо учитывать для корректной интерпретации натурных данных.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Мельников О.А., Левин Б.В., **Ершов В.В.** Необычное извержение Главного Пугачевского газодолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Доклады РАН. 2006. Т. 411. № 1. С. 85-88.
2. **Ершов В.В.**, Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газодолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Тихоокеанская геология. 2007. № 4. С. 69-74.
3. Мельников О.А., **Ершов В.В.**, Ким Ч.У., Сен Р.С. Некоторые результаты мониторинга Южно-Сахалинского газодолитокластитового вулкана летом 2005 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 4. С. 66-72.
4. Мельников О.А., **Ершов В.В.**, Ким Ч.У., Сен Р.С. О динамике грифонной деятельности газодолитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 25-41.
5. Жигулев В.В., Гуринов М.Г., **Ершов В.В.** Глубинное строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по результатам комплексных сейсмических исследований // Тихоокеанская геология. 2008. № 4. С. 16-21.
6. **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 газодолито-кластитового (грязевого) вулкана // Доклады РАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 533-537.
7. Доманский А.В., **Ершов В.В.**, Левин Б.В. Математическая модель неустановившихся течений геофлюидов при грязевулканических процессах // Доклады РАН. 2009. Т. 424. № 1. С. 107-110.
8. **Ершов В.В.**, Доманский А.В., Левин Б.В. Моделирование температурного режима грифонов грязевого вулкана // Доклады РАН. 2010. Т. 435. № 3. С. 384-389.
9. Мельников О.А., **Ершов В.В.** Грязевой (газодолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 87-93.
10. **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.
11. Доманский А.В., **Ершов В.В.** Математическое моделирование геофлюидодинамических процессов, протекающих в грязевулканических структурах // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 3. С.470-481.
12. **Ершов В.В.**, Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Доклады РАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 256-261.

Публикации в других рецензируемых журналах

13. **Ершов В.В.** Флюидодинамические процессы в зоне Центрально-Сахалинского разлома (по результатам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане) // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 345-360.

Монографии

14. Злобин Т.К., **Ершов В.В.**, Полец А.Ю. Строение земной коры, поле тектонических напряжений и грязевой вулканизм Сахалино-Курильского региона. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 176 с.

Публикации в научных сборниках и трудах конференций

15. Жигулев В.В., Злобин Т.К., **Ершов В.В.**, Гуринов М.Г. Сейсмические исследования МОВ-ОГТ и МПВ на Южно-Сахалинском грязевом вулкане // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений имени В.В. Федынского (2-4 марта 2006 г., Москва). М.: Научный мир, 2007. С. 158-163.
16. Доманский А.В., **Ершов В.В.** Математическое моделирование динамики геофлюидов в грязевулканических процессах (на примере грязевых вулканов Сахалина) // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22-25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. С. 157-159.
17. **Ершов В.В.** Статистический анализ температурного режима грифонов Южно-Сахалинского грязевого (газоводолитокластитового) вулкана // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сборник материалов II (XX) Сахалинской молодежной школы, Южно-Сахалинск, 4-10 июня 2007 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. С. 268-284.
18. **Ершов В.В.** Временные изменения элементного состава, температуры и дебита газа в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Первая международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная памяти академика А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, 24-27 февраля 2009 г., сборник материалов. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2009. С. 347-351.
19. **Ершов В.В.**, Доманский А.В. Расчет параметров газовых смесей в задачах математического моделирования грязевулканических процессов // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сборник материалов III Сахалинской молодежной школы, Южно-Сахалинск, 3-6 июня 2008 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. С. 29-40.
20. **Ершов В.В.** Флюидодинамические системы – индикаторы геодинамических процессов в земной коре // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения, материалы всероссийской конференции Хабаровск 12-15 сентября 2011 г. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2011. С. 48-51.
21. **Ершов В.В.** Динамика геофлюидов в зоне Центрально-Сахалинского разлома (по результатам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане) // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы-семинара Москва 17-21 октября 2011 г. Москва: ИФЗ РАН, 2011. Т. 1. С.84-89.

Заказ № 14-П/11/2013 Подписано в печать 08.11.2013 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1,2



ООО “Цифровичок”, г. Москва ул. Азовская, д.
13 тел. (495) 797-75-76; (495) 649-83-30
www.cfr.ru ; [e-mail:info@cfr.ru](mailto:info@cfr.ru)