

УДК 550.3+551.21 (470.62)

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ ТАМАНИ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2015 г. В.В. Ершов¹, А.Л. Собисевич², И.Н. Пузич²

¹ *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Приведены новые результаты комплексных исследований глубинного строения грязевых вулканов Шуго и Гора Карабетова (Керченско-Таманская грязевулканическая провинция). По результатам экспериментальных геофизических исследований, изотопной и гидрохимической геотермометрии и математического моделирования получены комплексные оценки глубины залегания резервуаров жидких и газообразных грязевулканических флюидов для каждого из рассматриваемых вулканов.

Ключевые слова: грязевой вулканизм, модель грязевулканической деятельности, геофизический разрез, Керченско-Таманская грязевулканическая провинция.

Научный интерес к грязевому вулканизму неразрывно связан с проблемами нефтегазоносности земных недр, изучением региональных геодинамических процессов и геоэкологии. На территории России в Керченско-Таманской грязевулканической провинции наблюдается наиболее активная грязевулканическая деятельность, являющаяся неотъемлемой частью современного этапа эволюции флюидо-магматических систем Северо-Западного Кавказа и Восточного Крыма. Многие грязевые вулканы расположены на континентальном шельфе, так что даже слабые их извержения могут не только осложнять навигацию, но и создавать проблемы при развитии инженерной инфраструктуры в прибрежных водах. Однако глубинное строение грязевых вулканов и механизмы их деятельности до сих пор не получили исчерпывающего объяснения.

Проявления грязевого вулканизма пространственно и генетически связаны с районами развития глиняного диапиризма в осадочной толще. Однако следует отметить, что некоторые исследователи (см., например, [Kopf, 2002]) разделяют грязевой вулканизм и глиняный диапиризм, отмечая ряд различий в механизмах этих явлений. Существуют модели, в которых природа грязевого вулканизма объясняется разгрузкой глубинных флюидов под действием аномально высокого пластового давления, дилатансии и компактизации. Присутствие газов в являющихся источником продуктов грязевого вулканизма геологических слоях также играет важную роль, во многом определяя режим грязевулканической деятельности. Чередование мощных взрывных извержений и периодов относительного покоя (свободного истечения) в значительной мере связано с особенностями газогенерации в недрах [Войтов и др., 2004; Войтов, Микадзе, Пузич, 2005].

Есть основания полагать, что источники глубинных флюидов, питающих грязевые вулканы Западно-Кубанского продольного и Керченско-Таманского поперечного прогибов, находятся за пределами осадочного чехла. В углероде CO₂ спонтанных газов грязевого вулкана Бугазский, например, были обнаружены образцы с мантийной углеродной меткой [Войтов и др., 2004]. По химическому и изотопно-углеродному облику газовых грифонов вулкана Бугазский, а также газовых струй из пространственно ориентированных вдоль морского побережья линейных зон глубинных тектонических

разломов, трассируемых газами с повышенным содержанием гелия и молекулярного водорода, можно заключить, что формирование комплексных газовых систем происходит в более древних породах, чем мезокайнозойские. Заметим, что по этому вопросу существуют и другие точки зрения. Так, например, в работе [Лаврушин и др., 1996] отмечается, что доля мантийной составляющей в общем объеме грязевулканических газов не достигает и 0.1 %. В любом случае, трудно представить, чтобы грязевулканические флюиды напрямую разгружались из мантии, не образуя промежуточных скоплений (резервуаров) в земной коре; локализация подобных резервуаров – актуальная задача геофизики. Исследования грязевого вулканизма затрагивают также вопросы холодной дегазации Земли и её взаимосвязи с сейсмическими процессами [Войтов, Микадзе, Пузич, 2005].

На протяжении последних лет неизменными объектами геолого-геофизических и геохимических исследований остаются два из наиболее активных грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической провинции – Шуго и Гора Карabetова [Богатиков и др., 2003; Собисевич и др., 2005; Шнюков и др., 2006; Собисевич, 2012]. Полученные ранее данные об их глубинном строении [Собисевич, Горбатиков, Овсяченко, 2008; Горбатиков, Собисевич, Овсяченко, 2008] вместе с результатами изотопной и гидрохимической геотермометрии могут служить основой для математического моделирования возможных механизмов деятельности этих вулканов. Результаты теоретических исследований процессов истечения вязкой газонасыщенной грязебрекчии для различных режимов извержения в пароксизмальной стадии приведены в [Руденко, Собисевич, Ратнер, 2009; Собисевич, Жостков, 2013].

В данном исследовании для математического описания движения грязевулканических флюидов в подводящем канале вулкана, считающегося трещиновато-пористой средой, были использованы нестационарные уравнения одно- и двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей – газа и водогрязевой смеси [Доманский, Ершов, 2011]. Согласно этой модели, нижняя часть подводящего канала мощностью H заполнена газом, а верхняя мощностью $L-H$ – водогрязевой смесью. Между газом и столбом водогрязевой смеси со временем устанавливается неустойчивое равновесие, которое нарушается с ростом давления газа, вытесняющего водогрязевую смесь. Вытеснение газом смеси продолжается до момента извержения вулкана, приводящего к сбросу давления газа, после чего начинается подготовка нового извержения.

В рамках такой модели представляется возможным получение однозначного решения обратной задачи, т.е. определения глубины залегания источника газа L и корня вулкана $L-H$ [Доманский, Ершов, 2011]. При этом периодичность извержений считается известной. Решение обратной задачи основывается на предположении, что длительность процессов двухфазной фильтрации и фильтрации газа в подводящем канале пропорциональна характерным временам этих процессов при условии равенства давлений газа и столба водогрязевой смеси на момент их равновесия.

Перед началом модельных расчетов нами были выполнены оценки значений входных параметров – химического состава грязевулканических газов, вязкости газовой смеси (μ), коэффициента её сжимаемости (z), среднего временного периода извержений (T_e), угла падения подводящего канала (α) и его проницаемости (k).

Средний химический состав газа определялся по литературным данным [Гемп и др., 1970; Лагунова, 1974; Гемп, Лагунова, Несмелова, 1979; Валяев и др., 1985; Лаврушин и др., 1996, 2003; Собисевич и др., 2005], которые предварительно проходили отбраковку. Пробы газа, которые предположительно были загрязнены атмосферным воздухом, во внимание не принимались. Загрязненными считались пробы, в которых

отмечалось большое содержание азота и кислорода, а отношение содержания этих элементов было близким к аналогичному показателю для атмосферного воздуха. На основе выполненного анализа (табл. 1) при своих расчетах мы приближенно считали, что для вулкана Гора Карабетова газовая смесь содержит 82 об. % метана и 18 об. % углекислого газа; для вулкана Шуго – 92 об. % метана и 8 об. % углекислого газа.

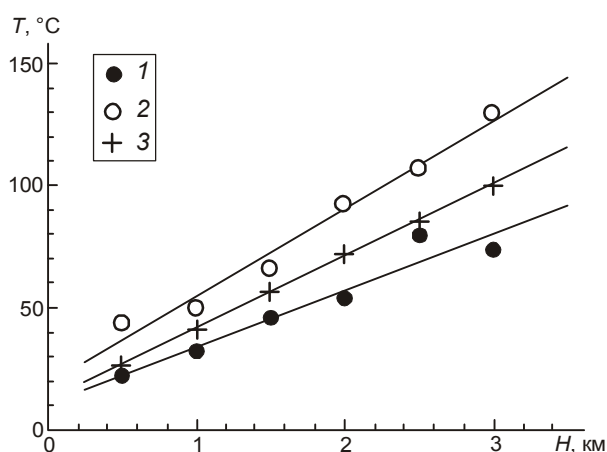
Таблица 1. Газовый состав для грязевых вулканов Гора Карабетова и Шуго

| Грязевой вулкан | Газовая компонента | Число проб | Среднее значение, об. % | Стандартное отклонение, об. % |
|-----------------|--------------------|------------|-------------------------|-------------------------------|
| Гора Карабетова | CH ₄ | 19 | 80.8 | 11.1 |
| | CO ₂ | 19 | 16.7 | 11.9 |
| | N ₂ | 18 | 2.1 | 2.5 |
| Шуго | CH ₄ | 26 | 89.2 | 2.8 |
| | CO ₂ | 26 | 5.1 | 6.4 |
| | N ₂ | 26 | 5.0 | 6.3 |

Для определения средней вязкости и коэффициента сжимаемости газовой смеси приближенно считалось, что температура и давление газа в какой-либо точке подводящего канала вулкана равны температуре и давлению вмещающих пород на той же глубине. Подводящий канал разбивался на участки мощностью 100 м, на каждом из которых раздельно вычислялись вязкость и коэффициент сжимаемости, после чего выполнялось осреднение этих параметров по всей длине канала. При выполнении таких расчетов необходимо знание среднего геотермического градиента в рассматриваемом регионе. Нами использовались результаты измерений температуры на глубине от 0.5 до 3 км (с шагом в 0.5 км) для Индоло-Кубанского прогиба, изложенные в [Тепловой ..., 1970], где для каждой из глубин приводятся минимальные, максимальные и средние значения измеренных температур (рис. 1).

Рис. 1. Результаты геотермических измерений в Индоло-Кубанском прогибе [Тепловой..., 1970] и их аппроксимация линейной регрессией

1–3 – минимальные (1), максимальные (2) и средние (3) значения температуры, T , °C



Аппроксимация эмпирических данных линейной регрессией по методу наименьших квадратов показывает, что средний геотермический градиент равен 29.5 °C/км. Искомое значение геотермического градиента лежит в диапазоне между 23.3 °C/км (нижняя граница) и 35.8 °C/км (верхняя). Далее нами используется допущение, что до глубин около 10 км зависимость температуры от глубины остается линейной, т.е. геотермический градиент является константой.

При оценке периода извержений считалось, что распределение извержений грязевых вулканов во времени описывается законом Пуассона. Учитывалось также, что полнота каталога извержений рассматриваемых вулканов, составленного по данным работы [Шнюков и др., 2006], не превышает 75 %. Такой вывод сделан в [Mellors et al., 2007] по результатам статистического анализа каталогов извержений грязевых вулканов Азербайджана, являющегося классическим регионом развития грязевого вулканизма. Для вулкана Гора Карабетова полученная нами оценка T_e составляет 5.8 лет, для вулкана Шуго – 8.4 лет; доверительные интервалы для величины T_e при доверительной вероятности 0.95 для Горы Карабетова (в годах) – 4.0–9.2; для вулкана Шуго – 3.8–30.8.

Наиболее трудно определяемый параметр – проницаемость подводящего канала. Грязевые вулканы и питающие их каналы приурочены к разломным зонам земной коры, которые характеризуются повышенной трещиноватостью пород, в связи с чем при расчетах брались достаточно высокие (первые сотни миллиарды) значения проницаемости.

В приводимой ниже табл. 2 представлены значения входных параметров, использованных нами при модельных расчетах, и результаты этих расчетов.

Таблица 2. Результаты модельных расчетов для различных значений входных параметров

| № | Грязевой вулкан | T_e , лет | α , ° | k , мД | μ_H , мкПа·с | μ_{L-H} , мкПа·с | $z \cdot T$, К | L , км | $L-H$, км |
|---|-----------------|-------------|--------------|----------|------------------|----------------------|-----------------|----------|------------|
| 1 | Гора Карабетова | 6 | 90 | 212.5 | 45.4 | 33.1 | 1142 | 9.71 | 5.05 |
| 2 | Шуго | 8 | 45 | 136.0 | 39.8 | 28.0 | 1002 | 8.38 | 4.36 |
| 3 | Шуго | 8 | 45 | 104.1 | 39.4 | 27.4 | 951 | 7.94 | 4.13 |
| 4 | Шуго | 4 | 45 | 136.0 | 37.9 | 25.2 | 763 | 6.29 | 3.27 |

Примечание: μ_H – вязкость газовой смеси на участке канала H ; μ_{L-H} – вязкость газовой смеси на участке канала $L-H$; $z \cdot T$ – среднее значение произведения температуры T и коэффициента сжимаемости z газовой смеси в подводящем канале.

При сопоставлении геофизических разрезов, построенных для двух рассматриваемых вулканов (рис. 2, *вверху*) по результатам метода микросейсмического зондирования, видно, что относительная интенсивность микросейсмических сигналов для подводящего канала вулкана Гора Карабетова в 1.5–2 раза выше, чем для вулкана Шуго. Поскольку этот параметр зависит от эффективности модуля сдвига [Горбатиков, 2005] и, следовательно, связан с трещиноватостью и проницаемостью среды, есть основания считать, что проницаемость питающего канала вулкана Гора Карабетова должна быть выше по сравнению с вулканом Шуго. Это обстоятельство было учтено в наших расчетах.

Оценки угла падения подводящего канала для каждого из рассматриваемых грязевых вулканов сделаны по геофизическим разрезам, полученным методом низкочастотного микросейсмического зондирования [Собисевич, Горбатиков, Овсяченко, 2008; Горбатиков, Собисевич, Овсяченко, 2008]. Надо отметить, что модельные оценки глубины залегания источника газа и корня вулкана довольно хорошо согласуются с полученными геофизическими данными (см. рис. 2).

Для дополнительных оценок глубины генерации грязевулканических флюидов были использованы различные изотопные и гидрохимические геотермометры. Пересчет температуры в глубину производился на основе определённого выше регионального геотермического градиента.

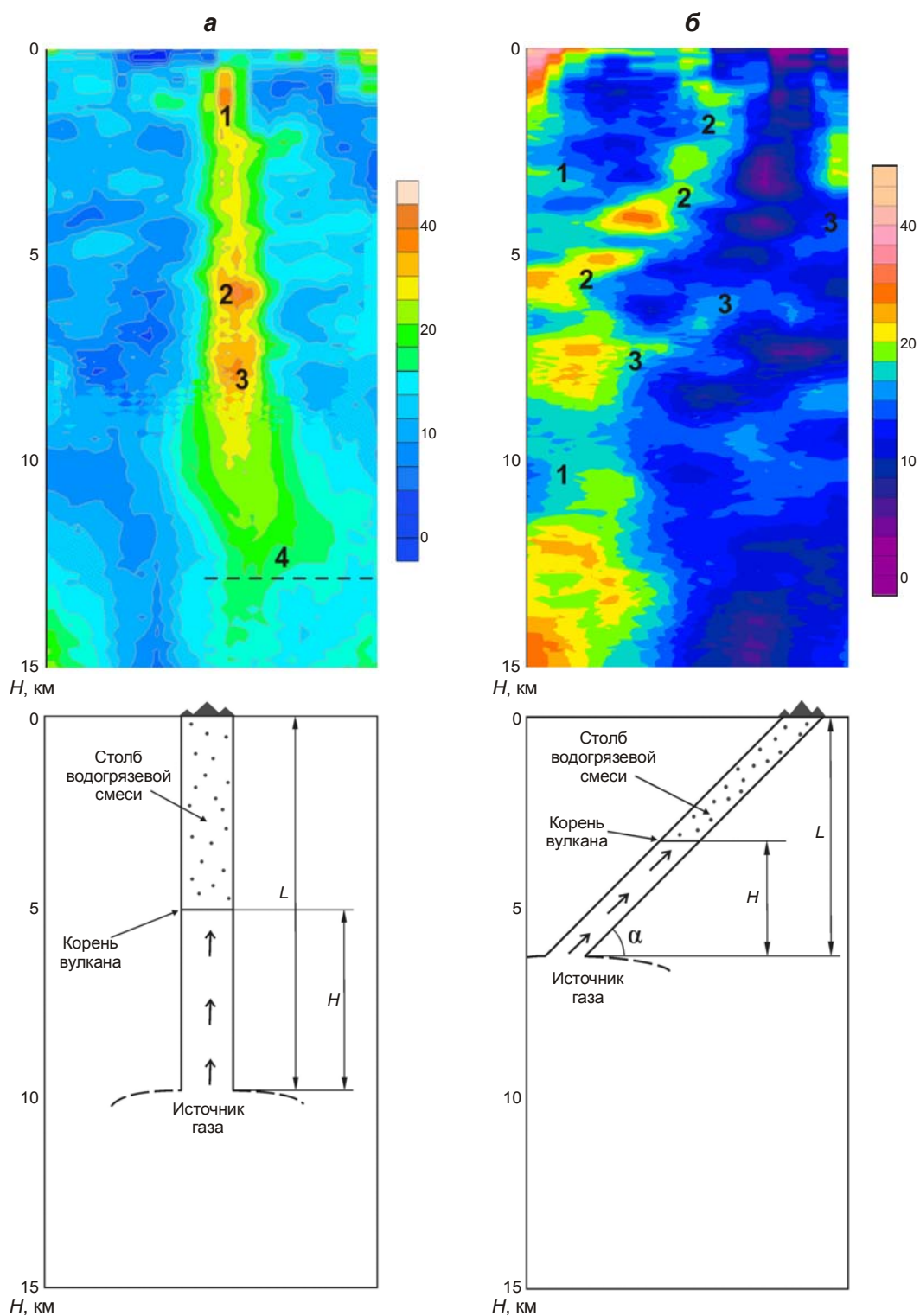


Рис. 2. Геофизические разрезы (вверху) и расчетные модели (внизу) грязевых вулканов Гора Карabetова (а) и Шуго (б). Цветовая шкала – относительная интенсивность реакции среды по разрезу на прохождение рэлеевских волн

1–3 – зоны пониженных скоростей, интерпретируемые в [Собисевич, Горбатиков, Овсяченко, 2008] как грязевулканические резервуары; 4 – область перехода к консолидированному фундаменту. Для вулкана Шуго, согласно [Горбатиков, Овсяченко, Собисевич, 2008], зона 1 соответствует Ахтырскому разлому, 2 – разлому вулкана, 3 – Гладковскому разлому; модель построена по данным строки 4 в табл. 2

Изотопный состав углерода CH_4 и CO_2 для вулканов Гора Карабетова и Шуго представлен в [Гемп и др., 1970; Валяев и др., 1985; Собисевич и др., 2005]. Согласно эмпирической зависимости изотопного состава углерода метана от температуры его генерации [Прасолов, 1990], значения $\delta^{13}\text{C}$ метана соответствуют в основном глубинам 8–10 км для первого из рассматриваемых вулканов и 7–8 км для второго. Значения температуры изотопного равновесия в системе CO_2 – CH_4 , рассчитанные по формулам из [Horita, 2001], имеют довольно большой разброс и отвечают глубинам генерации этих газов для вулкана Гора Карабетова 3–4.5 км, для вулкана Шуго – 2.5–7 км.

Вопрос о достижении изотопного равновесия в данной статье не обсуждается, тем не менее, отметим, что существует мнение об отсутствии изотопного обмена в неорганической системе CO_2 – CH_4 при низких температурах (до 150 °С) [Галимов, 1968]. Кроме того, в газах рассматриваемых вулканов часто встречается изотопно-тяжелый углекислый газ ($>+5$ ‰ PDB), наличие которого в грязевулканических газах принято объяснять анаэробной биодегградацией нефти [Etiopie et al., 2009]. С учетом этого следует с осторожностью относиться к температурным оценкам, которые получены с помощью геотермометров, использующих при расчетах изотопный состав углерода CO_2 .

Согласно нашим модельным представлениям о грязевулканической деятельности, глубина формирования грязевулканических вод должна приблизительно соответствовать глубине залегания корней грязевого вулкана, т.е. нижней границе источника водоглинистой смеси. На основе зависимостей химического состава природных вод от температуры (гидрохимические геотермометры Mg-Li, Na-Li, Na-K и Na-K-Ca) в [Лаврушин и др., 2003] вычислены температуры генерации вод рассматриваемых грязевых вулканов, которые соответствуют глубинам 2–3.5 км для вулкана Гора Карабетова и 3–5.5 км для вулкана Шуго.

Выводы

Таким образом, полученные разными методами результаты исследования глубинного строения грязевых вулканов Гора Карабетова и Шуго позволяют выполнить комплексную оценку глубины залегания резервуаров жидких и газообразных грязевулканических флюидов.

Для первого из названных вулканов глубина залегания источника газа составляет 5–10 км, его корни приурочены к глубинам 2.5–5 км; для второго аналогичные оценки составляют 6–8 и 3–5 км соответственно.

Используемая математическая модель грязевулканической деятельности вполне адекватна и может применяться для оценки основных параметров питающей системы других грязевых вулканов, находящихся в сходных геологических условиях.

Средний временной интервал между двумя последовательными извержениями – один из ключевых параметров модели, существенным образом влияющий на результат решения обратной задачи. Это лишний раз подчеркивает важность регулярных наблюдений за активностью грязевых вулканов, необходимых для получения более точной оценки периодичности извержений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-05-00762, 14-05-31246 и 14-05-90421-Укр-а) и Программы № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

- Богати́ков О.А., Войтов Г.И., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Науменко-Бондаренко И.И., Пузич И.Н., Коробейник Г.С. О пароксизмальном извержении грязевого вулкана Горы Карабетова 6 мая 2001 г. (Таманская грязевулканическая провинция) // Докл. РАН. 2003. Т. 390, № 6. С.805–808.
- Валяев Б.М., Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е., Прохоров В.С., Титков Г.А. Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. 1985. № 1. С.72–87.
- Войтов Г.И., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. О генерации органических структур нефтяного ряда в свете механохимической модели синтеза в сейсмических процессах // Геохимия. 2005. № 6. С.661–672.
- Войтов Г.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Пронин А.П., Микадзе Э.И., Науменко-Бондаренко И.И., Пузич И.Н. Эманационные и изотопно-углеродные нестабильности грифонных газов грязевого вулкана Бугазский и сопряженных с ним тектонических структур (Таманская грязевулканическая провинция) // Докл. РАН. 2004. Т. 394, № 1. С.85–88.
- Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 226 с.
- Гемп Г.Д., Лагунова И.А., Несмелова З.Н. Особенности формирования газового состава грязевых вулканов // Геохимия. 1979. № 12. С.1859–1867.
- Гемп С.Д., Дуброва Н.В., Несмелова З.Н., Бекетов В.М., Ходькова И.Л. Изотопный состав углерода углеродсодержащих газов (CH₄ и CO₂) грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1970. № 2. С.243–247.
- Горбатиков А.В. Способ сейсморазведки: Патент на изобретение RU № 2271554. Дата приоритета 25.03.2005.
- Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго // Докл. РАН. 2008. Т. 421, № 5. С.670–674.
- Доманский А.В., Ершов В.В. Математическое моделирование геофлюидодинамических процессов, протекающих в грязевулканических структурах // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С.470–481.
- Лаврушин В.Ю., Корф А., Deyhle A., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия) // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С.147–182.
- 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.
- Лагунова И.А. О генезисе CO₂ в газах грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1974. № 11. С.1711–1716.
- Прасолов Э.М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л.: Недра, 1990. 283 с.
- Руденко О.В., Собисевич А.Л., Ратнер С.В. Модель непрерывного истечения газосодержащей жидкости из полости через канал // Вестник Южного научного центра РАН. Т. 5, № 2. 2009. С.5–10.
- Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М.: ИФЗ РАН, 2012. 510 с.
- Собисевич А.Л., Жостков Р.А. О движении флюидонасыщенной грязебрекчии в выводящих структурах грязевых вулканов // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 4. С.46–56.
- Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Докл. РАН. 2008. Т. 422, № 4. С.542–546.
- Собисевич А.Л., Лаврова Н.И., Собисевич Л.Е., Микадзе Э.И., Овсяченко А.Н., Башорин В.Н., Пронин А.П., Гурбанов А.Г., Шевченко А.В. Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2005. 225 с.
- Тепловой режим недр СССР / Отв. ред. Ф.А. Макаренко, Б.Г. Поляк. М.: Наука, 1970. 224 с.

- Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Маслаков Н.А., Кутный В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: Кубаньгеология, 2006. 176 с.
- Etioppe G., Feyzullayev A., Milkov A.V., Waseda A., Mizobe K., Sun C.H. Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes // *Marine and Petroleum Geology*. 2009. V. 26. P.1692–1703.
- Horita J. Carbon isotope exchange in the system CO₂–CH₄ at elevated temperatures // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. P.1907–1919.
- Kopf A.J. Significance of mud volcanism // *Reviews of Geophysics*. 2002. V. 40. P.1–52.
- Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. doi: 10.1029/2006JB004489.

Сведения об авторах

ЕРШОВ Валерий Валерьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б. Тел.: 8(424) 279-15-17. E-mail: ershov@imgg.ru

СОБИСЕВИЧ Алексей Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-90-80. E-mail: alex@ifz.ru

ПУЗИЧ Ирина Николаевна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-87-52. E-mail: irina@ifz.ru

DEEP UNDERGROUND STRUCTURE OF MUD VOLCANOES IN TAMAN ACCORDING TO EXPERIMENTAL FIELD STUDIES AND MATHEMATICAL MODELING

V.V. Ershov¹, A.L. Sobisevich², I.N. Puzich²

¹ *Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. New results of comprehensive studies of the deep underground structure of Shugo and Karabetova mud volcanoes (Kerch-Taman mud volcanic province) are presented. According to the results of comprehensive interpretation of geophysical experimental data, isotope and hydrochemical data, and consequent mathematical modeling, the depths of mud volcanic reservoirs saturated with liquid and gaseous fluids for each of the volcanoes are estimated.

Keywords: mud volcanism, model for mud volcanic activity, geophysical profile, the Kerch-Taman mud volcanic province.