

УДК 551.21 (571.64)

О.А.МЕЛЬНИКОВ, В.В.ЕРШОВ

Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований

Рассматриваются общие сведения о грязевом вулканизме и научно-практической значимости изучения этого природного явления. Излагается краткий исторический обзор исследований грязевого вулканизма о-ва Сахалин. Приводятся основные результаты современных исследований. Формулируются задачи ближайших перспективных исследований.

Ключевые слова: грязевой вулканизм, математическое моделирование, извержение, мониторинг, вещественный состав, сейсмичность, о-в Сахалин.

Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research.
O.A.MELNIKOV, V.V.ERSHOV (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

This paper considers overall information about mud volcanoes, scientific and practical importance of study of these natural phenomena. Historic review about mud volcanoes of Sakhalin Island research is represented. Main results of contemporary researches of mud volcanoes are shown. Some problems in future trends of mud volcanoes research are stated.

Key words: mud volcanism, mathematical modeling, eruption, monitoring, material constitution, seismicity, the Sakhalin Island.

Большинство людей при слове «вулкан» представляет высокую, конической формы гору, из вершины которой время от времени с сильным грохотом выбрасываются на высоту несколько километров густые клубы дыма, пепла и раскаленные обломки камней, а по склонам течет огненно-жидкая лава. Однако кроме широко известного магматического существует еще грязевой тип вулканов. Сравнительно малая известность грязевого вулканизма объясняется прежде всего тем, что такие вулканы гораздо менее эффектны и представляют меньшую опасность для окружающей среды. Высота грязевых вулканов составляет десятки, реже – сотни метров, иногда грязевые вулканы не образуют гор вообще. Во время извержений из них на высоту десятки и сотни метров фонтанами выбрасывается сравнительно холодная насыщенная водой и газом разнообломочная грязевая масса – сопочная брекчия. В ряде случаев выбрасываемый газ возгорается, тогда над вулканом образуется огненный факел. Нередко извержения грязевых вулканов происходит в виде сравнительно спокойного выдавливания сопочной брекчии из выходного отверстия вулкана и ее медленного растекания по земной поверхности.

Прежде чем перейти к рассмотрению данного природного явления и результатов его исследований, следует сказать несколько слов о существующей терминологии. Считая термин «грязевой» не совсем приемлемым для научной литературы, мы предлагаем заменить его на «газоводолитокластитовый» [20], включающий названия всех трех компонентов:

МЕЛЬНИКОВ Олег Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, ЕРШОВ Валерий Валерьевич – научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск).
E-mail: ershov@imgg.ru

газа, воды и обломков осадочных горных пород (литокластиты). По этому принципу магматические вулканы следовало бы именовать газоловопирокластитовыми.

Грязевые вулканы широко распространены как на суше, так и в морских бассейнах, особенности их распределения рассмотрены в работах [29, 42]. Они обнаружены на территориях более 30 стран мира. В их распределении на Земле наблюдается такая же закономерность, как и для магматических вулканов: большая их часть приурочена к Альпийско-Гималайскому и Тихоокеанскому подвижным поясам. С научной точки зрения грязевые вулканы представляют собой природные флюидодинамические системы, в которых происходит интенсивный энергомассоперенос из недр Земли на ее поверхность.

При изучении грязевого вулканизма одним из важнейших является вопрос о его связи с нефтегазоносностью [33]. Считается, что грязевые вулканы – прямой признак наличия месторождения нефти и газа в регионе, поскольку оба природных объекта имеют сходный механизм образования.

Деятельность грязевых вулканов вносит значительный вклад в общий бюджет парниковых газов в атмосфере Земли, который необходимо корректно учитывать в моделях изменения климата [38–41].

Случаются и катастрофические извержения грязевых вулканов. Так, в мае 2006 г. на о-ве Ява (Индонезия) извержение влк. Люси заставило десятки тысяч людей сменить местожительство [37], экономический ущерб оценивается миллиардами долларов США. Подводные грязевые вулканы часто располагаются на континентальных шельфах, поэтому даже слабые извержения могут разрушать прибрежную инфраструктуру (кабельные каналы связи, нефтегазопроводы и др.) и затруднять навигацию в прибрежных водах. В связи с этим важно иметь корректную оценку пространственно-временных масштабов извержений грязевых вулканов.

Большинство участков проявления грязевого вулканизма приурочено к сейсмически активным регионам. Считается, что состав продуктов деятельности грязевых вулканов и интенсивность их поставки тесно связаны с сейсмотектоническими процессами в земной коре [2, 3, 21, 27, 35, 44, 47]. Анализ этой связи необходим, чтобы оценить возможность прогноза землетрясений по данным наблюдений за деятельностью грязевых вулканов. Высказывается такое мнение, что сильные землетрясения запускают извержения грязевых вулканов. В качестве одной из причин извержения влк. Люси рассматривается землетрясение незадолго до извержения [43, 45]. Другими словами, предполагается триггерный механизм связи между сильными землетрясениями и извержениями грязевых вулканов. Имеются также работы, где подобная связь рассматривается для грязевых вулканов других стран: Японии [36], Азербайджана [46], Италии [34].

В настоящее время обозначенные проблемы окончательно не решены, во многих случаях остаются на уровне допущений и предположений.

На Дальнем Востоке России наземные грязевые вулканы известны только на о-ве Сахалин (рис. 1). Здесь выделяют четыре участка проявления грязевого вулканизма: Дагинский грязевулканический участок в Ногликском районе, группа Пугачевских грязевых вулканов (рис. 2) и влк. Восточный – в Макаровском, Южно-Сахалинский грязевой вулкан (рис. 3) – в Анивском и Лесновский – в Корсаковском районе [20]. Наличие на о-ве Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, высокая современная сейсмотектоническая активность, сложные системы разломов делают этот регион уникальным местом для изучения грязевого вулканизма.

Первые обследования грязевых вулканов о-ва Сахалин выполнены японскими геологами Ф.Сайто и М.Уэда [22, 28]. В их работах приведены самые общие сведения о Южно-Сахалинском и Главном Пугачевском вулканах, которые в настоящее время представляют в основном исторический интерес. Однако некоторые выводы актуальны до сих пор – например, о приуроченности обоих вулканов к крупному региональному разлому, позднее получившему название Тымь-Поронайского, или Центрально-Сахалинского, взбросо-надвига.

В 1946 г. в пос. Новоалександровск была организована Сахалинская научно-исследовательская база АН СССР, преобразованная затем в Сахалинский комплексный научно-исследовательский институт АН СССР, а позднее – в Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН. Образованный в 1947 г. сектор геологии во главе с Е.М.Смеховым в составе Сахалинской научно-исследовательской базы АН СССР изучал грязевые вулканы о-ва Сахалин. Эти работы свелись к общему знакомству с деятельностью Главного Пугачевского вулкана и компилятивному обзору работ японских геологов. Сам Е.М.Смехов считал грязевой вулканизм уникальным явлением на советском Дальнем Востоке и указывал на необходимость его специальных исследований [25]. З.А.Чернышевская считала, что оживление деятельности грязевых вулканов о-ва Сахалин, возможно, связано с сейсмичностью острова [31].

В 1954 г. Н.Д.Цитенко открыл проявления грязевого вулканизма на побережье Дагинского залива, рассмотрел морфологические разновидности и состав продуктов деятельности Дагинских грифонов [30].

На протяжении нескольких десятилетий объектами изучения сахалинских геологов являлись сильные извержения двух самых крупных грязевых вулкана о-ва Сахалин – Главного Пугачевского и Южно-Сахалинского. Полевой отряд во главе с В.Н.Шиловым обследовал Южно-Сахалинский вулкан после извержения 20 марта 1959 г. [32].

Главный Пугачевский вулкан проявил себя двумя извержениями – 25 сентября 1961 г. и 31 августа 1967 г. Обследование этих извержений возглавлял И.М.Сирый, который занимался проблемами происхождения и механизма деятельности грязевых вулканов, а также изучением их связи с нефтегазонасыщенностью о-ва Сахалин [5, 13, 23, 24].

Летом 1975 г. для изучения грязевых вулканов о-ва Сахалин прибыла большая группа геологов из Азербайджана. Результаты работ отражены в фундаментальной монографии о грязевом вулканизме всех регионов СССР [33].

Извержение Южно-Сахалинского вулкана 22 октября 1979 г. исследовала полевая группа в составе В.Н.Занюкова, О.А.Мельникова и В.И.Федорченко [11].

10 июня 1986 г. на о-ве Сахалин стал известен участок проявления грязевого вулканизма вблизи пос. Лесное. Извержение изучали О.А.Мельников и А.Я.Ильев [19].

В мае 1997 г. на Южно-Сахалинском вулкане О.А.Мельников обнаружил новое поле сопочной брекчии сравнительно небольшого размера. Предположительно, извержение произошло в 1994–1996 гг. [7, 20]. В этом же 1997 г. с

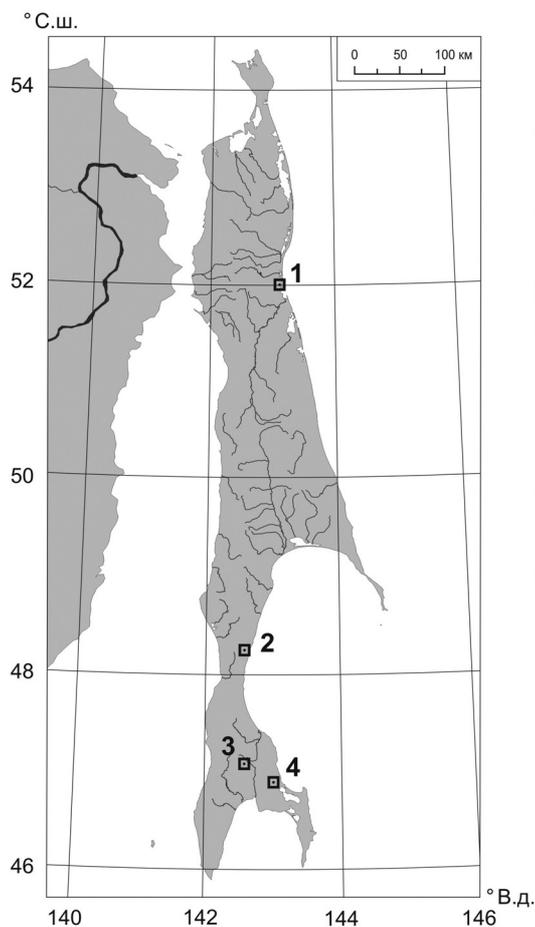


Рис. 1. Расположение участков проявления наземного грязевого вулканизма о-ва Сахалин: 1 – Дагинский грязе-вулканический участок; 2 – группа Пугачевских грязевых вулканов и влк. Восточный; 3 – Южно-Сахалинский грязевой вулкан; 4 – Лесновский грязевой вулкан



Рис. 2. Грязевое поле после сильного извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана зимой 2005 г. 2007 г. Фото В.В.Ершова



Рис. 3. Группа активных грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана со свежими излияниями водогрязевой смеси. 2008 г. Фото В.В.Ершова

вулканов (свежие грязеизлияния, газовые выбросы, сейсмогенное трещинообразование), вероятно, были вызваны Углегорским землетрясением 5 августа 2000 г. [12].

Интересные данные о подобной связи получены в ходе организованных А.С.Астаховым (Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН) наблюдений 13–23 июля 2001 г. перед началом Такойского роя землетрясений в Долинском районе, длившегося с конца июля по середину сентября. В одном из грифонов установлено повышение температуры водогрязевой смеси, в другом – дебита газа и содержания ряда элементов в водогрязевой смеси [2]. При обследовании 17 августа 2001 г. обнаружены изменения рельефа грязевого поля, где образовался холм вспучивания высотой около 2 м и диаметром около 30 м.

В конце декабря 2001 г. произошло последнее извержение Южно-Сахалинского вулкана. Обследование летом 2002 г. показало, что оно почти не уступало извержению 1959 г. – самому крупному из известных [18].

Извержение Главного Пугачевского вулкана ориентировочно зимой 2005 г. было на порядок более мощным, чем большинство прежних извержений [9, 15]. Обследование,

помощью дендрохронологического метода обнаружен расположенный поблизости потухший грязевой вулкан [16]. В 1998–1999 гг. на Южно-Сахалинском вулкане сотрудники ИМГиГ провели малоглубинные сейсмические исследования методом преломленных волн, которые позволили установить внутреннее строение привершинной части вулкана [1].

В 2000 г. О.А.Мельников составил крупномасштабную (1 : 25 000) геоформационную карту 5–10-километровой зоны вдоль Тымь-Поронайского взбросо-надвига, в том числе вблизи Южно-Сахалинского вулкана. Эта карта отражает современные наиболее детальные представления о геологическом строении в районе вулкана [20].

Обследование группы Пугачевских вулканов в октябре 2000 г. позволило предположить наличие связи между грязевым вулканизмом о-ва Сахалин и сейсмичностью в регионе. Установленные О.А.Мельниковым существенные изменения в деятельности

проведенное О.А.Мельниковым и В.В.Ершовым, выявило его сходство с извержением 1934 г., которое также происходило не из одного, а из нескольких центров и имело сопоставимый объем изверженного материала. Сделано предположение о двухранговой периодичности извержения: несколько лет – для сравнительно небольших извержений и несколько десятилетий – для сильных.

Финансовая поддержка РФФИ позволила организовать в полевые сезоны 2005–2007 гг. длительные мониторинговые наблюдения на Южно-Сахалинском вулкане за дебитом, химическим и изотопным составом свободных газов, температурой и элементным составом водогрязевой смеси [14, 17]. Установлены статистически значимые проявления грифоновой деятельности вулкана во время Горнозаводского землетрясения 17(18) августа 2006 г. и Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. [10]. Все аномалии наблюдаемых параметров можно объяснить взаимодействием «вода–порода–газ» в верхней части подводящего канала грязевого вулкана [8].

Также впервые разработана математическая модель подготовки извержений грязевых вулканов, в основе которой лежат нестационарные уравнения фильтрации газа и двухфазной фильтрации газа и водогрязевой смеси [6]. В рамках модели поставлена обратная задача по определению глубины залегания источника газа, питающего грязевую вулкан, и получено ее однозначное решение. Согласно расчетам, для Южно-Сахалинского вулкана источник газа залегает на глубине 8–9 км, что хорошо согласуется с данными по изотопии углерода этого газа. Также впервые создана математическая модель температурного режима грифонов грязевых вулканов, основанная на нестационарном уравнении теплопроводности с конвективным слагаемым. Изменения температурного режима грифонов обусловлены главным образом вариациями скорости движения водогрязевой смеси в грифонных каналах.

Говоря о перспективах исследований грязевого вулканизма о-ва Сахалин, следует очертить круг первоочередных задач для познания этого природного явления. Одна из них – определение путей миграции, глубины и условий генерации грязевулканических флюидов. Для этого необходимо исследование глубинного строения грязевых вулканов о-ва Сахалин с помощью современных сейсмических методов. Так, для грязевых вулканов Шуго и горы Карabetова с помощью метода микросейсмического зондирования, разработанного в Институте физики Земли РАН, получены данные о внутреннем строении вулканов до глубин 15–25 км [4, 26]. Аналогичные работы целесообразны и для нашего региона. Отметим, что на о-ве Сахалин в настоящее время в основном изучено только приповерхностное строение грязевых вулканов.

Подводящий канал грязевого вулкана представляет собой трещиновато-пористую среду, в которой движется многокомпонентная смесь газа, жидкости и частиц горных пород. Сложная динамика вещественного состава продуктов деятельности вулкана обусловлена множеством различных физико-химических процессов. Изучение физико-химических условий образования и миграции грязевулканических флюидов, их взаимодействия с вмещающими породами, а также химического и минерального равновесия в водогрязевой смеси позволит установить закономерности формирования вещественного состава и его изменений. Для этого необходимо комплексное исследование химического, минерального и изотопного составов всех трех фаз (твердой, жидкой и газообразной) продуктов деятельности вулкана.

Для более глубокого понимания физических процессов, лежащих в основе грязевого вулканизма, и корректной интерпретации получаемых эмпирических данных требуется адекватное математическое описание грязевулканических процессов. В настоящее время нужны относительно простые модели, позволяющие хотя бы в первом приближении количественно описывать различные наблюдаемые эффекты. Это касается моделирования воздействия на грязевулканические структуры тектонических напряжений и сейсмических волн от землетрясений, миграции жидких и газообразных грязевулканических флюидов в подводящем канале вулкана, изменения проницаемости канала при миграции флюидов и др.

Данные о температурном режиме грифонов Южно-Сахалинского вулкана, а также соответствующая математическая модель являются методической основой для организации непрерывных дистанционных наблюдений (телеметрии) за температурой водогрязевой смеси в грифонах грязевых вулканов. При этом значения температуры водогрязевой смеси можно сразу же сопоставлять с теоретически рассчитанными значениями. Это позволит в режиме реального времени определять 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. Результаты таких наблюдений могут быть использованы для прогноза землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аргентов В.В., Жигулев В.В., Мельников О.А., Патрикеев В.Н. Опыт применения малоглубинной сейсмики для выяснения строения Южно-Сахалинского газодогрязевого вулкана // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 5. С. 3-11.
2. Астахов А.С., Сергеев К.Ф., Мельников О.А. и др. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации // Докл. АН. 2002. Т. 386, № 2. С. 223-228.
3. 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.
4. Горбатилов А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексуно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуто // Докл. АН. 2008. Т. 421, № 5. С. 670-674.
5. Горкун В.Н., Сирьк И.М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30-42.
6. Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В. Математическая модель неустановившихся течений геофлюидов при грязевулканических процессах // Докл. АН. 2009. Т. 424, № 1. С. 107-110.
7. Дуничев В.М., Литенко Н.Л. Извержение грязевых вулканов Сахалина в 1994 г. // Материалы 32-й науч.-метод. конф. преподавателей ЮСГПИ (апрель 1997 г.). Ч. 2. Южно-Сахалинск: ЮСГПИ, 1997. С. 42-44.
8. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин // Региональн. геология и металлогения. 2010. № 42. С. 49-57.
9. Ершов В.В., Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газодолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 69-74.
10. Ершов В.В., Левин Б.В., Мельников О.А., Доманский А.В. Проявления Невельского и Горнозаводского землетрясений 2006–2007 гг. в динамике грифонной деятельности Южно-Сахалинского газодолитокластитового (грязевого) вулкана // Докл. АН. 2008. Т. 423, № 4. С. 533-537.
11. Занюков В.Н., Мельников О.А., Федорченко В.И. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 127-130.
12. Ивашенко А.И., Булгаков Р.Ф., Ким Чун Ун и др. Землетрясение 4 (5) августа 2000 г. на Сахалине // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. 1-й Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26–29 сент. 2000 г. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 109-125.
13. Ильев А.Я., Сапрыкин С.М., Сирьк И.М. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. // Изв. Сахалин. отд. геогр. о-ва СССР. 1970. № 1. С. 92-99.
14. Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се. Некоторые результаты мониторинга Южно-Сахалинского газодолитокластитового вулкана летом 2005 г. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 4. С. 66-72.
15. Мельников О.А., Левин Б.В., Ершов В.В. Необычное извержение Главного Пугачевского газодолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Докл. АН. 2006. Т. 411, № 1. С. 85-88.
16. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газодогрязевого вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 3. С. 37-46.
17. Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се. О динамике грифонной деятельности газодолитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 5. С. 25-41.
18. Мельников О.А., Сергеев К.Ф., Рыбин А.В., Жарков Р.В. О новом активном извержении одного из «грязевых» (газодолитокластитовых) вулканов на Сахалине и природе грязевого вулканизма // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 4. С. 536-541.
19. Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеан. геология. 1989. Т. 8, № 3. С. 42-49.
20. Мельников О.А. Южно-Сахалинский газодолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект природы на Дальнем Востоке России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. 48 с.

21. Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 204 с.
22. Сайто Ф. Грязевые вулканы вблизи железной дороги Тохара–Маока на Южном Сахалине // Тигаку дзасси. 1928. Т. 40, № 477. С. 1-5. Яп. яз.
23. Сирьк И.М., Федорченко В.И. Извержение Пугачевского вулкана на Сахалине осенью 1961 г. // Тр. СахКНИИ. 1962. Вып. 12. С. 103-113.
24. Сирьк И.М. Нефтегазоносность восточных склонов Западно-Сахалинских гор. М.: Наука, 1968. 248 с.
25. Смахов Е.М. Геологическое строение острова Сахалин и его нефтегазоносность. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1953. 322 с.
26. Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Докл. АН. 2008. Т. 423, № 4. С. 533-537.
27. Собисевич А.Л., Лаверова Н.И., Собисевич Л.Е. и др. Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2005. 225 с.
28. Уэда М. Грязевой вулкан Магунтан – отчет об изучении исторических мест и памятников естественной истории. Тохара, 1938. 40 с. Яп. яз.
29. Холодов В.Н. Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщение 1. Грязевулканические провинции и морфология грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 3. С. 227-241.
30. Цитенко Н.Д. Грязевые вулканы в Дагинском районе о. Сахалина // Тр. ВНИГРИ. 1961. Вып. 181. С. 171-175.
31. Чернышевская З.А. О грязевых вулканах в южной части Сахалина // Тр. СахКНИИ. 1958. Вып. 6. С. 118-130.
32. Шилов В.Н., Захарова М.А., Ильев А.Я., Подзоров А.В. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана весной 1959 г. // Тр. СахКНИИ. 1961. Вып. 10. С. 83-99.
33. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А. и др. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку: Элм, 1980. 167 с.
34. Bonini M. Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy // *Tectonophysics*. 2009. Vol. 474. P. 723-735.
35. Bonini M. Structural controls on a carbon dioxide-driven mud volcano field in the Northern Apennines (Pieve Santo Stefano, Italy): Relations with pre-existing steep discontinuities and seismicity // *J. Struct. Geol.* 2009. Vol. 31. P. 44-54.
36. Chigira M., Tanaka K. Structural features and the history of mud volcanoes in Southern Hokkaido, Northern Japan // *J. Geol. Soc. Jap.* 1997. Vol. 103, N 8. P. 781-791.
37. Cyranoski D. Indonesian eruption: muddy waters // *Nature*. 2007. Vol. 445. P. 812-815.
38. Dimitrov L.I. Mud volcanoes – the most important pathway for degassing deeply buried sediments // *Earth Sci. Rev.* 2002. Vol. 59. P. 49-76.
39. Etiope G., Milkov A.V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere // *Environ. Geol.* 2004. Vol. 46. P. 997-1002.
40. Etiope G., Klusmann R.W. Geologic emissions of methane to the atmosphere // *Chemosphere*. 2002. Vol. 49. P. 777-789.
41. Kopf A.J. Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the earth's climate // *Int. J. Earth Sci.* 2003. Vol. 92, N 5. P. 806-816.
42. Kopf A.J. Significance of mud volcanism // *Rev. Geophys.* 2002. Vol. 40, N 2. P. 1-52.
43. Manga M., Brumm M., Rudolph M.L. Earthquake triggering of mud volcanoes // *Mar. Pet. Geol.* 2009. Vol. 26. P. 1785-1798.
44. Martinelli G., Dado A. Mud volcano monitoring and seismic events // *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity: Proc. NATO Advanced Research Workshop, Baku, Azerbaijan, 20–22 May, 2003*. Dordrecht: Springer, 2005. P. 187-199.
45. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G. et al. Triggering and dynamic evolution of Lusi mud volcano, Indonesia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 261. P. 375-388.
46. Mellors R., Kilb D., Aliyev A. et al. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. doi: 10.1029/2006JB004489.
47. Yang T.F., Fu C.C., Walia V. et al. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: multi-parameter automatic gas monitoring results // *Pure Appl. Geophys.* 2006. Vol. 163, N 4. P. 693-709.