

УДК 551.21:550:370

ДИНАМИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА НА ПРИМЕРЕ СОПКИ АНДРУСОВА (БУЛГАНАКСКИЙ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИЙ ОЧАГ, КЕРЧЕНСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

© 2015 г. В. В. Оленченко, Е. Ф. Шнюков, О. Л. Гаськова, С. Н. Кох,
Э. В. Сокол, С. Б. Бортникова, И. Н. Ельцов

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 10.06.2014 г.

Поступило 09.06.2014 г.

На основе комплексного геофизического и гидрогеохимического изучения проявлений грязевого вулканизма в пределах Булганакского очага (Керченский полуостров) определена периодичность выбросов грязевого вулкана сопка Андрусова в период его непосредственной активизации.

DOI: 10.7868/S0869565215260217

Газово-грязевой вулканизм представляет собой одно из звеньев в глобальном процессе дегазации земных недр. В образовании грязевых вулканов задействована сложная комбинация процессов седиментации, диагенеза, созревания рассеянного органического вещества, истирания и дробления пород, их выноса к поверхности в составе различных транспортирующих сред – газа, пульпы, вод, и, наконец, аккумуляции продуктов извержений. Стремительный подъем к поверхности газонасыщенных и обводненных породных масс завершается извержениями, сценарии которых варьируются от спокойного истечения грязевых потоков до газовых взрывов [1–4].

Некоторые из этих процессов в настоящее время изучены досконально, тогда как другие практически не изучены. При обилии данных о внешней морфологии грязевых вулканов данные об их внутреннем строении крайне скудны [4]. В частности, неизвестны детали строения вулканических жерл и подводных каналов, нет сведений об изменении их конфигурации до и после извержения, нет данных о характеристиках малоуглубленных резервуаров газов и минерализованных вод, питающих грифоны и сальзы, и их поведении накануне выбросов. Из-за ограниченности

инструментария, позволяющего “заглянуть” в недра работающей вулканической системы, до сих пор исследователям не удавалось детально наблюдать развитие во времени извержения грязевых вулканов.

В данном сообщении представлены уникальные результаты натурального геофизического эксперимента, которые совместно с определением гидрохимических параметров грязевулканических вод могут успешно использоваться для исследования геометрии подводных каналов накануне и непосредственно в процессе извержения.

Объекты исследования расположены на территории классической активной Керченско-Таманской грязевулканической провинции [2, 5]. По характеру выносимого на поверхность обломочного материала (песчаники, известняки, мергели, глинисто-сидеритовые конкреции, алевролиты, глины неогена и палеогена, а также киммерийские железные руды) корни керченских грязевых вулканов прослеживаются до низов майкопских отложений, а таманских – до верхнего мела [2, 6].

Непосредственные геофизические наблюдения были проведены в сентябре 2013 г. в пределах Булганакского грязевулканического очага, расположенного на южном крыле Бондаренковской антиклинали, в 8–10 км севернее г. Керчь (45°25'39" с. ш.; 36°28'41" в. д., рис. 1). Активность этого очага, крупнейшего на Керченском полуострове (площадь 4 км²), отвечает пассивной грифонно-сальзовой стадии и выражается в спокойном излиянии минерализованных вод, жидкой грязи (~5000 л/сут) и углеводородных газов (~100 м³/сут). В составе выделяющихся газов преобладает метан (95–96%), доля CO₂ составляет 2–4% [2, 6]. Постоянная газовая эманация ведет к

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской Академии наук, Новосибирск*

*Отделение морской геологии и осадочного
рудобразования Национальной академии наук Украины,
Киев*

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

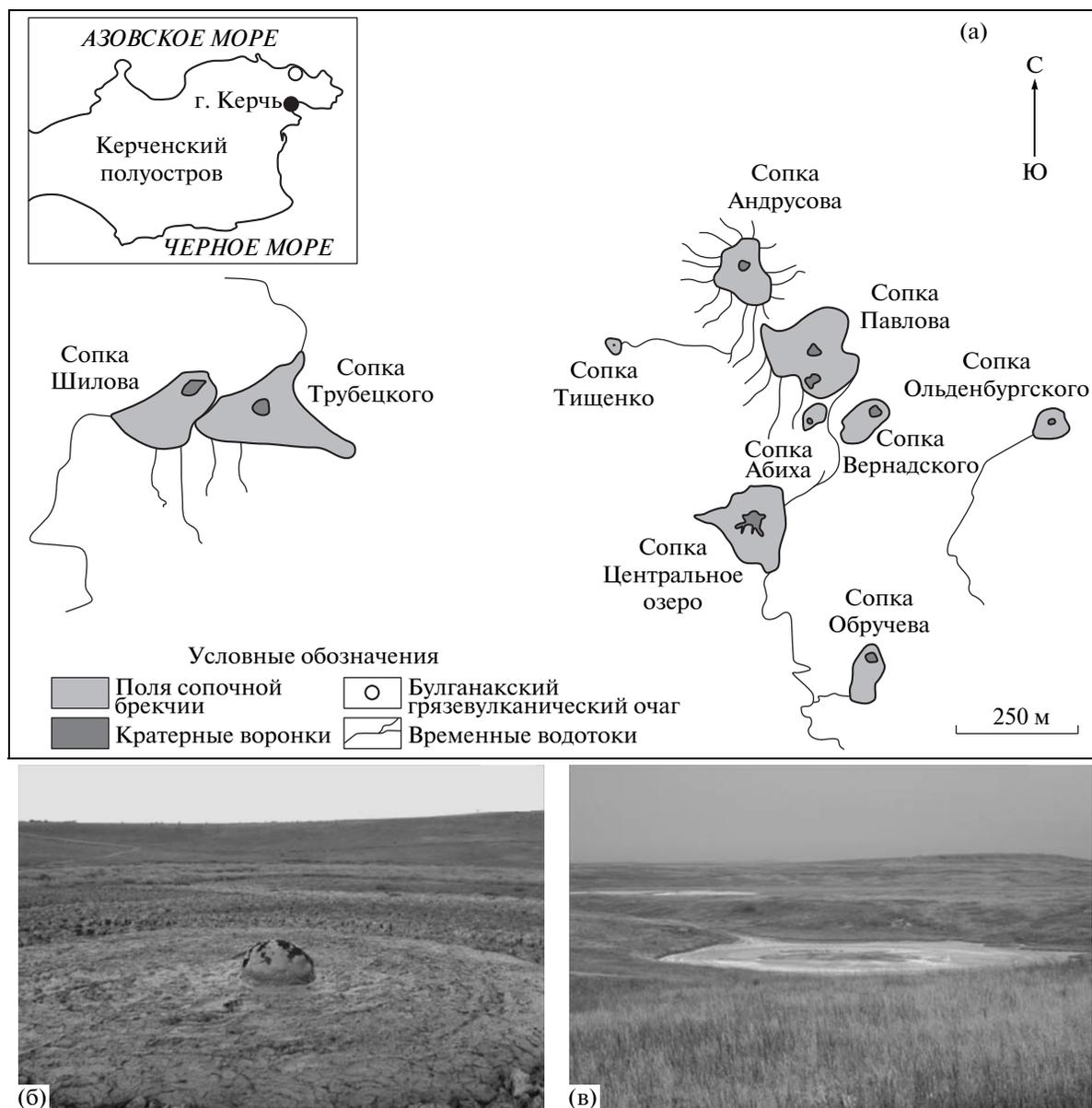


Рис. 1. а – схема расположения объектов в пределах Булганакского грязевулканического очага; б – грязевой вулкан сопка Андрусова в момент вспышки активности (19.09.2013 г.); в – панорама Булганакского грязевулканического очага (на переднем плане – сопка Центральное озеро).

разгрузке подземных камер и снятию избыточного давления, предотвращая тем самым катастрофические извержения. В XX столетии были зарегистрированы лишь два сравнительно бурных извержения сопки Андрусова – в 1926 и 1986 гг. Как следствие, грязевые вулканы Булганакского поля объединяют морфогенетические типы построек, возникающих при извержении обводненного (маловязкого) материала – мелкие сопки, грифоны и сальзы. Основная площадь очага занята сальзами, заполненными минерализованной водой, глинистой пульпой и илами. В северной части очага располагаются пологие сопки Андрусова, Павлова, Ти-

щенко, Аби́ха, Вернадского, в южной – Обручева и Центральное озеро, на западе – сопки Трубецкого и Ши́лова, на востоке – Ольденбургского (рис. 1). Самая крупная сопка Андрусова возвышается над местностью на 5–7 м, имея диаметр основания 300 м и кратерную площадку 50 м в поперечнике.

В июне 2012 г. нами было выполнено гидрогеохимическое опробование источников и сальз Булганакского очага: растворы вулкана Андрусова (отобраны в боковом выходе, где доля жидкой фазы была существенно больше, чем твердой), вулкана Ольденбургского, Травертиновых источников, сопки Обручева. Пробы отбирали в пла-

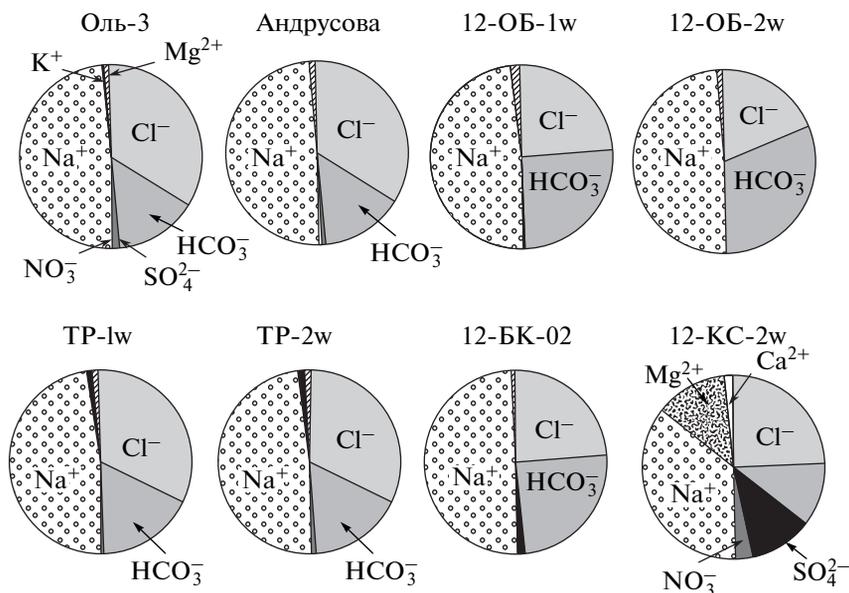


Рис. 2. Основной ионный состав растворов влк. Ольденбургского (Оль-3), Андрусова, сопки Обручева (ОБ), травертиновых источников (ТР), источников Булганакского (БК), Каялы-Сарт (КС), мг-экв. %.

стикомые контейнеры, на месте замеряли pH, Eh, электропроводность. После отстаивания воды пропускали через фильтр “синяя лента” и помещали в контейнеры. Растворы были проанализированы на основной анионный и катионный составы методами титриметрии, турбидиметрии, фотометрии. Микроэлементный состав был определен методом ИСП-АЭС на приборе IRIS Advantage (2000) в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (Новосибирск).

По значениям pH и основному ионному составу вода источников относится к щелочным-сильнощелочным солончатым до соленых растворам хлоридно-гидрокарбонатного или гидрокарбонатно-хлоридного класса (рис. 2). Тип вод во всех пробах — натриевый, что свидетельствует о том, что основная доля в растворах грязевых вулканов представлена захороненными и современными морскими водами. Уровень минерализации и микроэлементный состав позволяют отнести их к водоносному комплексу глин майкопских отложений (олигоцен) [2].

Оценки температур флюидогенерации, выполненные нами по Mg–Li-термометру [7] и кислородному термометру ($\delta^{18}\text{O}$) [8] для современных травертинов этой площади, составляют 52–78 и 54–75°C. Это отвечает глубинам 2.5–3 км, соответствует уровню расположения майкопской толщи и позволяет поддержать мнение С.В. Альбова [9] о том, что в формировании гидрогеохимических характеристик вод Булганакского грязевулканического очага были задействованы глубоко погруженные непромытые и слабо промытые комплексы осадков с солеными водами.

Косвенным подтверждением высокой минерализации поровых растворов является массовая кристаллизация солей: галита (NaCl), тинкалконита ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), буры ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), троны ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), гейлюссита ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), нортупита ($\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$) и нитратина (NaNO_3).

Геофизические исследования внутреннего строения сопки Андрусова выполнены с использованием современной модификации метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) — электротомографии (ЭТ). Электротомография относится к группе методов электроразведки, основанных на различии горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). В отличие от метода ВЭЗ, используемого для изучения горизонтально-слоистых структур, технология ЭТ предназначена для исследований сложнопостроенных двумерных и трехмерных геологических сред. Методом ЭТ определяется геоэлектрическая структура приповерхностного пространства. Элементы вулканической системы хорошо дифференцированы по величине УЭС, что является благоприятным фактором для определения глубины залегания и геометрических особенностей резервуаров, ловушек и каналов [10]. Поскольку основным носителем электропроводности вещества в данном случае являются растворенные в поровых растворах соли, ЭТ позволяет уверенно определять тип наполняющих пористые породы флюидов (газ, вода, рассол).

Во время работ 19 сентября 2013 г. с 9.00 до 13.00 произошла активизация вулкана Андрусова,

что дало возможность впервые зафиксировать изменения геоэлектрических параметров подповерхностного пространства грязевого вулкана непосредственно в процессе извержения. В ходе извержения наблюдался эпизодический (импульсный) выброс газов, воды и глинистой пульпы ($T = 18\text{--}20^\circ\text{C}$). Профиль электрических зондирований ЭТ проходил через центральную часть сопки Андрусова, при этом середина профиля располагалась над жерлом вулкана, из которого при извержении изливалась грязь. Длину профиля определяли длиной стандартной электроразведочной косы 115 м с расстоянием между электродами 5 м. В качестве измерительного прибора применяли многоэлектродную электроразведочную станцию “Скала-48”, разработанную в ИНГГ СО РАН [11]. Для измерения УЭС использовали последовательность подключения электродов, соответствующую установке Шлюмберже. Быстродействие электроразведочной аппаратуры позволяло измерять УЭС разреза через каждые 7 мин. Измерения непрерывно велись в течение 3 ч. Наблюдения за поведением вулкана показали, что при вялотекущем извержении сопки Андрусова длительность фазы роста давления в камере, собственно извержения и релаксации системы сопоставима со временем измерения УЭС. Это дало возможность проследить изменение УЭС подповерхностного пространства вулкана во времени в процессе извержения. Полученный массив данных обрабатывался с помощью программы Res2Dinv [12]. В итоге получали двумерные (2D) разрезы УЭС геологической среды.

Геоэлектрические разрезы сопки Андрусова характеризуются очень низким УЭС ($0.7\text{--}3.0 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, рис. 3) вследствие высокой минерализации поровых вод и засоленности грунтов. Согласно [13] при таких УЭС минерализация поровых растворов в глинистых грунтах должна составлять около 20 г/л, что близко к данным лабораторного анализа (18 г/л). Минимальными УЭС ($0.7\text{--}1.0 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) характеризуется жерловая грязь текучепластичной консистенции и грязь в промежуточной камере. Сопочная брекчия, слагающая тело вулкана, обладает повышенным УЭС ($2\text{--}3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) за счет большого количества песчаной фракции и включений обломков горных пород. В области подводящего канала отмечается пережим слоя повышенного УЭС. В целом вулканическая застройка представляет собой высокопроводящую среду с отчетливым обособлением верхней (кратер) и нижней (приповерхностная камера) частей, соединенных подводящим каналом, поставляющим к поверхности газ, минерализованную воду и пульпу.

На серии разрезов-кадров, иллюстрирующих изменения геоэлектрического разреза сопки Андрусова в процессе ее извержения (рис. 3), УЭС фиксирует динамику изменения состояния сре-

ды, иными словами, отражает процесс подъема газонасыщенного флюида ($t = 0\text{--}15$ мин), раскрытие жерла вулкана ($t = 30$ мин), извержения и затем затягивания канала пластичной глиной ($t = 45\text{--}60$ мин). Таким образом, полный цикл функционирования типичной грязевулканической сопки, включающий раскрытие канала, движение по нему разуплотненной газо-водно-глинистой пульпы, ее стремительный выброс и смыкание стенок канала в результате падения газового давления составил 45 мин. В момент наибольшего раскрытия канала поперечный размер проводящей зоны в осевой части составляет порядка 1 м и увеличивается до 10 м в жерловой части.

Наблюдение за динамикой УЭС вулкана на глубине 5 м в процессе извержения в течение 3 ч позволило выявить цикл изменения УЭС, период которого приблизительно равен 6 ч, что составляет почти половину периода полусуточных лунных приливов (12 ч 25 мин). Такие совпадения позволили предположить, что периодическая активизация вулкана обусловлена приливными силами, так как именно 19 сентября 2013 г. отмечалось полнолуние. Связь между моментами катастрофических извержений грязевых вулканов и космическими циклами была обоснована [14]. Возможно, полученные нами данные придадут новый импульс развитию этой идеи.

Таким образом, получены следующие результаты.

На грязевом вулкане Андрусова реализована методика повторных измерений методом электротомографии активных грязевых вулканов. С помощью повторных измерений определен механизм извержения, изучено изменение структуры подповерхностного пространства при подъеме и разгрузке газо-грязевой смеси.

Периодичность выбросов вулкана, составляющая ~45 мин, регулируется подъемом и накоплением газов в приповерхностной камере, откуда при достижении критического давления газы уходят вверх и реализуются на поверхности в виде грязевых извержений. Предполагается, что грязевой вулкан активизируется во время полнолуния, когда период активности вулкана в течение суток составляет 6 ч.

Твердая фаза выбросов представляет собой обводненный, гидротермально переработанный материал вмещающих пород, поровое пространство которых заполнено захороненными морскими рассолами, в разной степени разбавленными метеорными водами и газами. Удельное электрическое сопротивление грязевой смеси составляет $0.7\text{--}1.0 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, такие низкие значения УЭС говорят о высокой (до 20 г/л) степени минерализации жидкой фазы грязи.

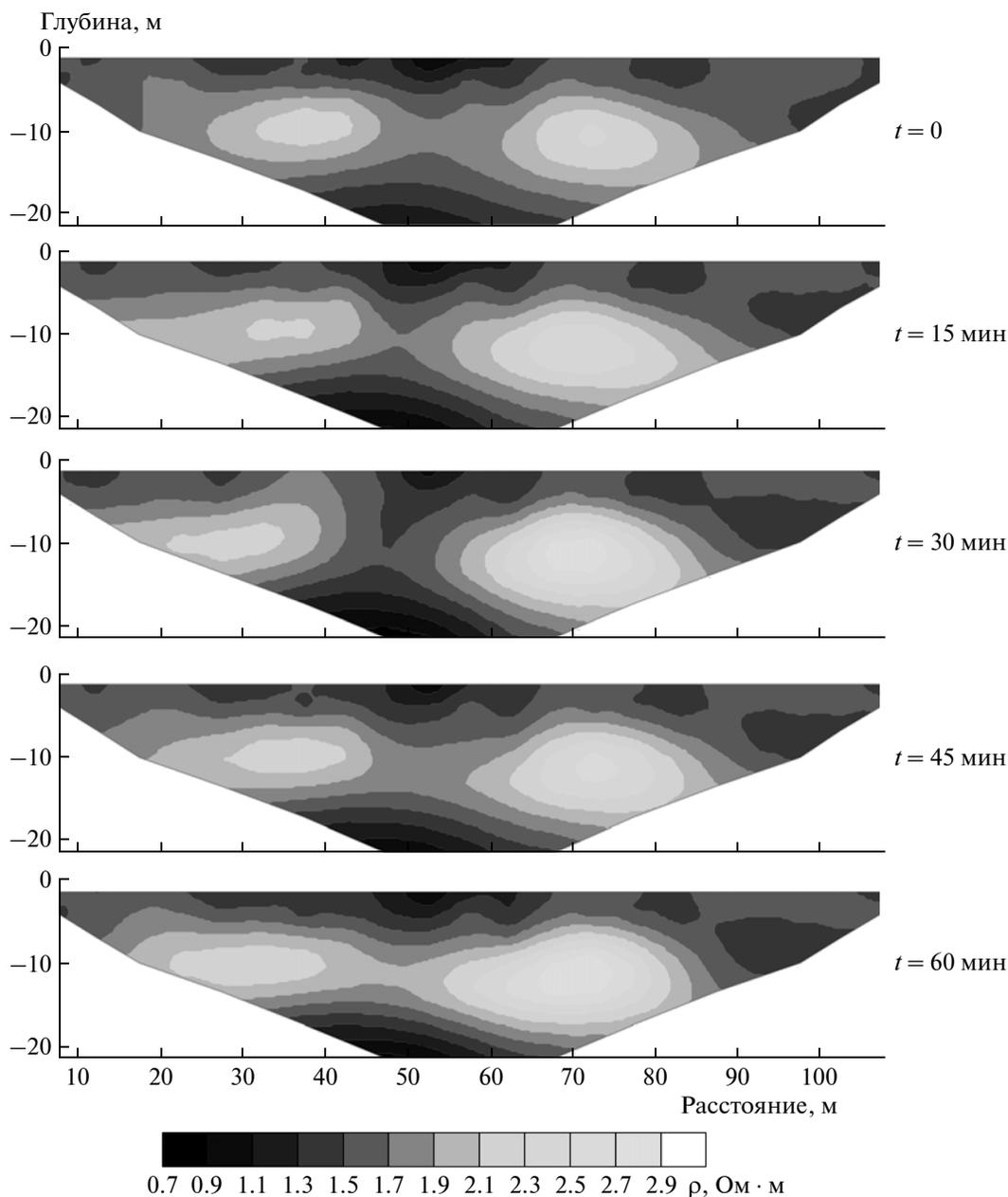


Рис. 3. Изменение геоэлектрических параметров во времени в процессе извержения вулкана Андрусова.

На основании изучения состава жидкой фазы вещества из жерла вулканов можно утверждать, что основным источником растворов являются захороненные морские воды, а с газами, поступающими из глубины, выносятся ряд микроэлементов (анионогенные: As, Se, В; металлы: Cu, Zn, Fe, Al, Ag, Sn и др.), в то время как концентрации макрокомпонентов (Ca, Mg, K, Na, Cl, S) отражают степень разбавления морских вод поверхностными или пластовыми, более пресными.

Авторы благодарят сотрудников Керченского стационара Отделения морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины С.П. Наумен-

ко, а также Е.Н. Рыбак и М.А. Деяка за участие в полевых работах 2012, 2013 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН и НАН Украины (№ 1-2013) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00798).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании нефтегазоносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.

2. Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар, 2005. 184 с.
3. Холодов В.Н. // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.
4. Kopf A.J. // Rev. Geophys. 2002. V. 40. № 2. P. 1005–1012.
5. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: Геос, 2012. 348 с.
6. Нестеровский В.А., Титова Н.О. // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 28–33.
7. Kharaka Y.K., Mariner R.H. In: Thermal History of Sedimentary Basins. Methods and Case Histories. N.Y.: Springer, 1989. P. 99–117.
8. Anderson T.F., Arthur M.A. In: Stable Isotopes in Sedimentary Geology. Georgia: SEPM, 1983. P. 1–151.
9. Альбов С.В. Гидрогеология Крыма. Тр. Крымск. фил. АН УССР. Киев, 1956. 245 с.
10. Ping-Yu Chang, Shu-Kai Chang, Hsing-Chang Liu, Shin Chung Wang // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2011. V. 22. № 1. P. 1–14.
11. Балков Е.В., Панин Г.Л., Маништейн Ю.А., Маништейн А.К., Белобородов В.А. // Геофизика. 2012. № 6. С. 54–63.
12. Loke M.H. Tutorial. RES2DINV. Ver. 3.59. Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion Using the Least-Squares Method. Malaysia: Geotomo Software, 2010. 148 p.
13. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. Госстрой России. М.: Производств. и науч.-исслед. ин-т по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИС) Госстроя России, 2004.
14. Guliev I.S., Feizullayev A.A. All about Mud Volcanoes. Baku: Nafta-press, 1997, 52 с.