

УДК 552.5

А.В. Маслов¹, В.П. Шевченко², А.Ю. Бычков³**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СОПОЧНЫХ ИЛАХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ: В ПОИСКАХ СЛЕДОВ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЮВЕНИЛЬНОГО КОМПОНЕНТА***Институт геологии и геохимии имени акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. акад. Вонсовского, 15**Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 620016, Yekaterinburg, Vonsovsky st., 15
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 117997, Moscow, Nakhimovsky av., 36
Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Взгляды исследователей на причины грязевого вулканизма с течением времени эволюционировали. На ранних этапах считалось, что грязевые вулканы сходны с обычными вулканами. Позднее их стали связывать с процессами в осадочных бассейнах, хотя попытки увязать грязевый вулканизм с магматическими проявлениями и подпиткой ювенильными компонентами есть и сейчас. Находки последних лет в продуктах грязевых вулканов ртути, самородного золота, серебра, серы, меди, железа и аксессуарных минералов позволяют ряду исследователей предполагать существование сквозных глубинных потоков углеводородов из мантии и рассматривать грязевые вулканы как своего рода трубы дегазации. Результаты выполненного нами анализа микроэлементного состава сопочных илов грязевых вулканов в разных районах мира (Керченский п-ов, Северо-Западный Кавказ, Сахалин, Джунгарский бассейн, Андаманские о-ва, Кадисский залив, Восточное Средиземноморье и Восточная Ява) подтверждают представления о том, что в них, как и в составе сопочных флюидов (вода, метан, углекислота и гелий), следы воздействия мантийного/ювенильного компонента не наблюдаются.

Ключевые слова: грязевые вулканы, сопочный ил, редкие и рассеянные элементы.

Researchers' views on the causes of mud volcanism have evolved over time. In the early stages, mud volcanoes were considered common to volcanoes. Later, they began to be associated with processes in sedimentary basins, although attempts to link mud volcanism with magmatic manifestations and replenishment of juvenile components still exist. Findings of mercury, native gold, silver, sulfur, copper, iron and accessory minerals in the products of mud volcanoes in recent years allow a number of researchers to assume the existence of deep-seated flows of hydrocarbons from the mantle, and to consider mud volcanoes as a kind of degassing pipes. The results of the analysis of trace element composition of mud volcanoes sediments in different regions of the world (Kerch Peninsula, North-West Caucasus, Sakhalin, Dzhungar Basin, Andaman Islands, Cadiz Bay, Eastern Mediterranean and Eastern Java) confirm the idea that in them, as in the mud volcanoes fluids (water, methane, carbon dioxide, and helium), traces of the mantle/juvenile component are not observed.

Key words: mud volcanoes, sediments, trace elements.

Введение. Изучением грязевых вулканов (ГВ) в разные годы занимались многие российские и советские специалисты, среди них Г.В. Абих, А.А. Алиев, А.Д. Архангельский, В.В. Белоусов, Г.И. Войтов, Д.В. Голубятников, И.М. Губкин, И.Н. Гусаков, Е.В. Кудряшов, В.Ю. Лаврушин, О.А. Мельников, И.В. Мушкетов, Р.Р. Рахманов, А.Л. Собисевич, Э.В. Сокол, А.В. Сорочинская, М.И. Субботта, Т.Ю. Тверитинова, Ю.А. Федоров, В.Е. Хаин, В.Н. Холодов, Р.Б. Шакиров, Н.С. Шатский, Е.Ф. Шнюков и др.

Взгляды на причины грязевого вулканизма с течением времени эволюционировали. На первых этапах ГВ считались структурами, близкими к обычным вулканам. Позднее их стали связывать преимущественно с процессами в осадочных/породных бассейнах, хотя попытки увязать ГВ с магматическими проявлениями, как отмечено в публикации [Лаврушин, 2012], встречаются и сейчас. На большом фактическом материале показано, что обогащение сопочных вод ГВ Li и B как будто бы не связано с подпиткой их эндогенными флю-

¹ Институт геологии и геохимии имени акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, гл. науч. с., докт. геол.-минер. н., член-корр. РАН; e-mail: amas2004@mail.ru

² Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, зам. директора по геологическому направлению, канд. геол.-минер. н.; e-mail: vshevch@ocean.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: andrewbychkov@rambler.ru

идами. Установлено, что утяжеление изотопного состава углерода метана и уголекислоты происходит в результате постседиментационных преобразований органического вещества, а формирование изотопного состава грязевулканических вод во многом контролируется иллитизацией смектита. Все это лучше согласуется с гипотезами «газового» и/или «элизионного» происхождения грязевулканических систем [Лаврушин, 2012]. Результаты исследования изотопного состава гелия в газах ГВ также не противоречат сказанному. Считается, что наличие в ряде случаев «ультратяжелой» уголекислоты в ГВ может быть следствием изотопного фракционирования при многоактной подземной дегазации и неравновесных условий разгрузки флюида и, соответственно, не связано с влиянием магматических/мантийных эманаций.

По данным [Korff, 2002; Холодов, 2012, 2019; Лаврушин, 2012], в литературе описано несколько основных механизмов формирования ГВ. При этом, как отмечено В.Ю. Лаврушиным [2012, с. 183]: «... при изучении грязевых вулканов особый интерес вызывает поиск мантийной (ювенильной) компоненты в составе флюидов, разгружающихся через эти вулканы». Так, в публикации [Шнюков и др., 2017, с. 19, 20], подчеркнуто, что в последние годы исходя из находок в продуктах ГВ: «...различных мантийных элементов, в частности ртуты и акцессорных минералов ..., а также интерпретации геофизических профилей, широко постулируется мнение о глубинных корнях грязевых вулканов, в том числе их связи с мантией». Только в Южном Каспии установлено более 100 следов восходящих глубинных газовых потоков [Хаустов, 2011], с которыми нередко связывают и эруптивные каналы ГВ. Такая пространственная ассоциация ведет, по всей видимости, к появлению в составе флюидов и твердых выносов ГВ глубинных компонентов фундамента или верхней мантии, играющих определенную роль в формировании геохимического облика продуктов ГВ [Шнюков и др., 2017].

Также отмечено, что при минералогических исследованиях сопочной брекчий ГВ Западно-Черноморской впадины были «...неожиданно встречены акцессорные минералы-новообразования — самородное золото, серебро, сера, медь, железо, ряд необычных ... оксидов, оплавленные мелкие частицы пород» [Шнюков, Нетребская, 2014, с. 66, 67]. Исходя из сказанного авторы указанной работы считают возможным «...предполагать существование сквозных глубинных потоков углеводородов из мантии, образующих своего рода “трубы дегазации”...». В то же время анализ микроэлементного состава сопочных брекчий и илов под указанным углом зрения практически не проводился. Ниже мы рассмотрим этот вопрос на предмет выявления признаков/следов воздей-

ствия на сопочные илы ГВ в различных регионах мантийной/ювенильной компоненты.

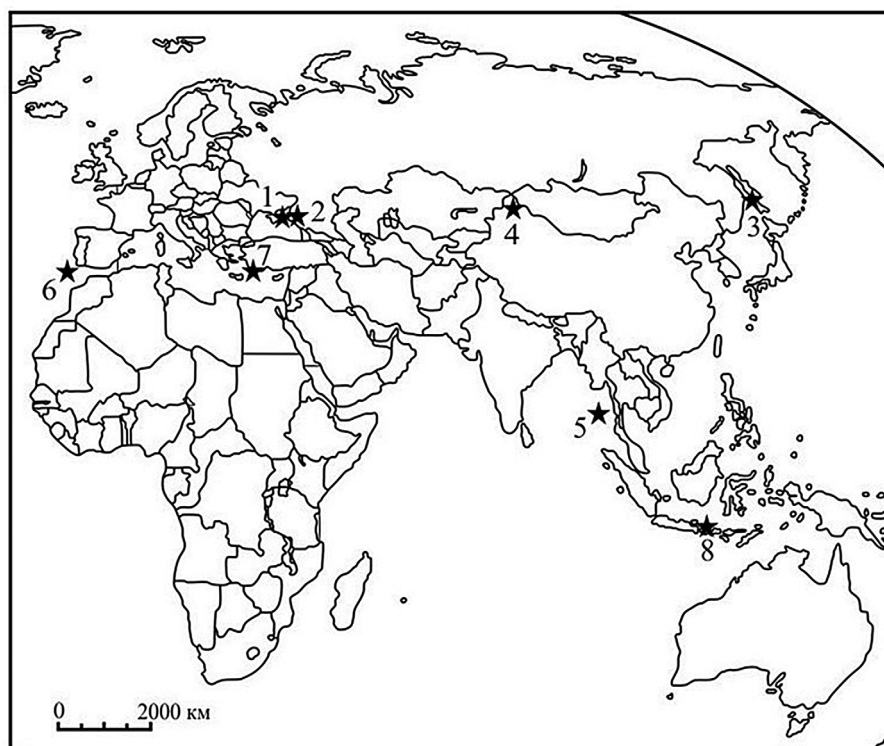
Материалы и методы исследований. Данных о распределении в валовых пробах сопочных илов ГВ редких и рассеянных элементов в литературе крайне мало. Они опубликованы для Керченского п-ова [Федоров и др., 2011; Мельчаков и др., 2017; Sokol et al., 2018] и Кавказа [Федоров и др., 2011; Лаврушин, 2012; Маслов, Шевченко, 2020], Сахалина [Сорочинская и др., 2008, 2009, 2015; Shakirov et al., 2018], Джунгарского бассейна, Северо-Западного Китая [Nakada et al., 2011; Wan et al., 2015], Андаманских о-вов [Vignesh et al., 2016], Кадисского залива [Mhammedi et al., 2008; Carvalho et al., 2018, 2019], Восточного Средиземноморья [Talas et al., 2015] и Восточной Явы [Agustawijaya et al., 2017] (рис. 1).

Керченско-Таманская грязевулканическая провинция отвечает наиболее глубоким частям Керченско-Таманского, Индоло-Кубанского и Туапсинского краевых прогибов, а также Керченско-Таманской складчатой зоне Северо-Западного Кавказа и Горного Крыма [Тверитинова и др., 2015] и ссылки в этой работе. Большинство ГВ расположено на Керченском (Крым) и Таманском (Северо-Западный Кавказ) полуостровах, значительное число их есть и в акваториях Азовского и Черного морей. ГВ в основном представляют собой пологие конусовидные сопки, сложенные сопочной брекчий.

По геолого-геофизическим данным корни многих ГВ в этом регионе локализованы на глубине 8–10 км, но в отдельных случаях достигают глубины более 10–25 км [Шнюков и др., 1992; Тверитинова и др., 2015; Федоров, 2018]. Основным источником сопочных брекчий и илов ГВ считаются глины майкопской серии олигоцена–нижнего миоцена, сформированные преимущественно за счет тонкой алюмосиликокластики, транспортировавшейся в западную часть Индоло-Кубанского прогиба из южных районов Восточно-Европейской платформы [Лаврушин, 2012; Sokol et al., 2018] и ссылки в последней работе. Нами использованы оригинальные данные о распределении редких и рассеянных элементов, которое установлено методом ИСП МС в сопочных илах ГВ Костырино (Керченский п-ов), Азовское Пекло, Ахтанизовский, Гефест, Гладковский, Красный Октябрь, Миска, Разнокольский, Семигорский, Тиздар, Цимбалы, Шапсугский, Шуго (Северо-Западный Кавказ) (всего 42 валовых образца) и двух грязевых вулканов на о-ве Сахалин. Методика анализа подробно описана в работах [Федоров и др., 2011; Маслов, Шевченко, 2020]. Аналогичные сведения для ГВ Булганак заимствованы из работы [Sokol et al., 2018].

В южной части о-ва Сахалин известны крупные системы ГВ (Южно-Сахалинская и Пугачев-

Рис. 1. Районы распространения ГВ (показаны звездочками), данные о распределении редких и рассеянных элементов в сопочных илах которых рассмотрены нами: 1 — Керченский п-ов; 2 — Северо-Западный Кавказ; 3 — о-в Сахалин; 4 — Джунгарский бассейн; 5 — Андаманские о-ва; 6 — Кадисский залив; 7 — Восточное Средиземноморье; 8 — Восточная Ява



ская) и отдельные ГВ (Восточный, Лесновский и др.) [Мельников, Ильев, 1989; Мельников, 2011; Сорочинская и др., 2015; и др.]. Все они приурочены к полю распространения отложений быковской свиты верхнего мела (алевролиты и аргиллиты, мощность до 3000 м) и тяготеют к крупным субмеридиональным разломам [Сорочинская и др., 2009]. Данные о распределении редких и рассеянных элементов в сопочных илах ГВ Сахалина, полученные методом ИСП МС для 16 валовых образцов, заимствованы нами из публикаций [Сорочинская и др., 2015; Shakirov et al., 2018].

Джунгарский бассейн расположен в северо-западной части Китая между орогенными поясами северо-западного и северо-восточного Джунгара и Тянь-Шаня [Qiu et al., 2008; Wan et al., 2015]. Он сформирован в результате наложения в позднем палеозое—среднем кайнозое форландового бассейна на бассейн надрифтовой впадины. ГВ тяготеют к южной границе этого бассейна. В публикации [Wan et al., 2015] приведены данные о содержании Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, редкоземельных элементов (РЗЭ), Hf, Ta, Pb, Th и U в 18 валовых образцах сопочных илов ГВ Айкигоу и Байянгоу, полученные методом ИСП МС.

На Андаманских о-вах (Баратанг, Дигилпур и др.), входящих в состав островной дуги Санда, ГВ расположены в пределах ее аккреционной призмы и приурочены к системам мелких надвигов, по которым сопочные брекчии и илы выжимаются на дневную поверхность [Vignesh et al., 2016]. Считается, что в существенной части это материал

с погружающейся в зону субдукции океанической плиты. Мы заимствовали из работы [Vignesh et al., 2016] данные о содержании в 15 валовых образцах продуктов ГВ таких редких и рассеянных элементов, как Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Hf, Ta, Pb, Th и U.

Несколько ГВ (Салоники, Афина, Амстердам и др.) известно в Восточном Средиземноморье западнее Кипра на подводных горах Анаксимандра, относящихся к внешней невулканической зоне Кипрской дуги [Ten Veen et al., 2004; Lykousis et al., 2009; Talas et al., 2015; Шнюков и др., 2017; и др.]. Глубина моря варьирует здесь от 1300 до 2000 м. В публикации [Talas et al., 2015] приведены данные о среднем содержании As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Hg, La, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sr, Th, Ti, V и Zn в продуктах названных ГВ, полученные методом ИСП МС.

В Кадисском заливе Атлантического океана ГВ (более 60) обнаружены в основном в восточной его части. Они были открыты на рубеже XX и XXI вв. [Gardner, 2000, 2001; Pinheiro et al., 2003; и др.], и с тех пор их интенсивно изучают [Шнюков и др., 2017]. Большинство ГВ расположено в мелководной части аккреционного комплекса [Gutscher et al., 2009], хотя некоторые встречаются на глубине от 1550 до 3880 м [Carvalho et al., 2019]. В составе сопочных брекчий ГВ преобладают породы среднего и верхнего миоцена, а также плиоцена. Источником их считаются олистостромовые толщи миоцена, в которых описаны обломки аргиллитов, глин, мергелей и известняков палеогена и верхнего мела [Шнюков и др., 2017] и ссылки в этой работе.

В публикации [Mhammedi et al., 2008] приведены сведения о содержании ограниченного ряда элементов-примесей (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb и U) в кернах донных осадков, отобранных гравитационными трубками. В статье [Carvalho et al., 2019] приведены медианные концентрации РЗЭ в сопочных илах ГВ Сагреш, Бонжардим, Соловьев и Порту (всего 46 валовых образцов), полученные методом ИСП МС.

Значительное число грязевых палеовулканов известно в Индонезийском архипелаге, однако есть здесь и действующие ГВ. Так, в публикации [Agustawijaya et al., 2017] охарактеризован ГВ Люси, расположенный в восточной части о-ва Ява. Сопочная брекчия этого ГВ представлена преимущественно глинистыми породами плейстоценовой формации Верхний Калибенг. В указанной публикации приведены значения концентрации РЗЭ в 24 валовых образцах сопочного ила, полученные методом инструментального нейтронно-активационного анализа.

Данные о содержании редких и рассеянных элементов в сопочных илах ГВ перечисленных выше районов мы сопоставили с аналогичными данными для среднего постархейского глинистого сланца (РААС) — классического референтного объекта осадочной геохимии [Taylor, McLennan, 1985]. Концентрацию РЗЭ в сопочных илах нормировали на хондрит [Taylor, McLennan, 1985] и, кроме того, проанализировали распределение точек состава сопочных илов на ряде дискриминантных диаграмм.

Результаты исследований и их обсуждение. Предполагается [Летников, 1999], что геохимическая специализация флюидных систем в значительной мере определяется глубиной их формирования и меняется по мере изменения зрелости (мощности) литосферы. Для флюидных систем тонкой океанической литосферы — это Au, Ag, Hg, Sb и As, для аналогичных систем мощной континентальной литосферы — Zr, Ta, Nb, РЗЭ, Be, U, Th и Y. Флюидные системы переходных между ними типов литосферы характеризуются Ni—Co—Pb—Cu—Mo—Zn или Sn—W—Be—Mn—Fe специализацией. В соответствии со сказанным, если сопочные илы ГВ подверглись в какой-то степени воздействию глубинных гидротермальных/флюидных процессов, то следы такого воздействия могут быть выявлены при сопоставлении их с теми или иными референтными геохимическими объектами, например, с РААС или UCC (верхней континентальной корой).

Сопочные илы ГВ Керченского п-ова характеризуются относительно РААС немного повышенным $(1,16–1,32) \cdot \text{РААС}$ средним содержанием только Zn, Sr, Mo и Hf. Максимальная концентрация, превышающая пороговую величину $2,00 \cdot \text{РААС}$, свойственна здесь только Sr (2,89) и Hf (2,38) (рис. 2, а).

Для сопочных илов ГВ Северо-Западного Кавказа повышенные против РААС средние значения концентрации характерны только для Sr и Mo $(1,33 \cdot \text{ и } 2,42 \cdot \text{РААС}$ соответственно). В то же время максимальная концентрация значительно большего числа элементов превышает пороговое значение $2,00 \cdot \text{РААС}$. Это характерно для Sc, Cr, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Nb, Mo, Ba, Pb и U, но не для всех исследованных нами образцов (рис. 2, б).

В сопочном иле ГВ о-ва Сахалин только среднее содержание Sn выше в 1,55 раза, чем в РААС. Средняя концентрация остальных элементов варьирует от 0,09 до $0,98 \cdot \text{РААС}$. Превышающая величину $2,00 \cdot \text{РААС}$ максимальная концентрация характерна только для Mo (4,00) и Sn (3,75) (рис. 2, в).

Для сопочного ила ГВ в Джунгарском бассейне характерно несколько более высокое, чем в РААС, среднее содержание Sr (1,64). Максимальная концентрация $>2,00 \cdot \text{РААС}$ присуща Sr, Ba, Pb и U (рис. 2, г).

Сопочные илы ГВ Андаманских о-вов обладают несколько или заметно более высокими, чем в РААС, средними значениями концентрации Sc, Cr $(1,32 \cdot \text{РААС})$, Co, Ni, Mo и Sn $(4,50 \cdot \text{РААС})$. Максимальная концентрация этих же элементов, за исключением Cr, здесь выше $2,00 \cdot \text{РААС}$ (рис. 2, д).

Среднее содержание всех определенных в сопочном иле ГВ Кадисского залива редких и рассеянных элементов меньше, чем в РААС (за исключением Mo, рис. 2, е). Выше, чем $2,00 \cdot \text{РААС}$, здесь только максимальные значения концентрации Zn (2,74), Mo (12,61) и U (2,01).

Наконец, сопочные илы ГВ в Восточном Средиземноморье характеризуются средней концентрацией только Ni и Sr, превышающей содержание этих элементов в РААС (рис. 2, ж). Для них же свойственна и более высокая, чем $2,00 \cdot \text{РААС}$, максимальная концентрация (5,82 и 3,57 соответственно).

К сожалению, в работе [Taylor, McLennan, 1985] нет сведений о содержании в РААС таких элементов, как Au, Ag, Hg, Sb, As и Be. Но и в отсутствие этих данных можно видеть, что в большинстве рассмотренных выше случаев в той или иной степени повышенной относительно РААС средней или максимальной концентрацией характеризуются не все индикаторные, по представлениям Ф.А. Летникова, ассоциации элементов для разных типов коры. Исключение — сопочные илы ГВ Андаманских о-вов; считается, что они сложены в существенной части материалом, выдавливаемым через разломы в аккреционной призме с погружающейся в зону субдукции океанической плиты [Vignesh et al., 2016].

В то же время на диаграммах Th—La—Sc [Taylor, McLennan, 1985], Ni—V—10Th [Bracciali et al., 2007] и Cr/Th—Th/Sc [Condie, Wronkiewicz, 1990;

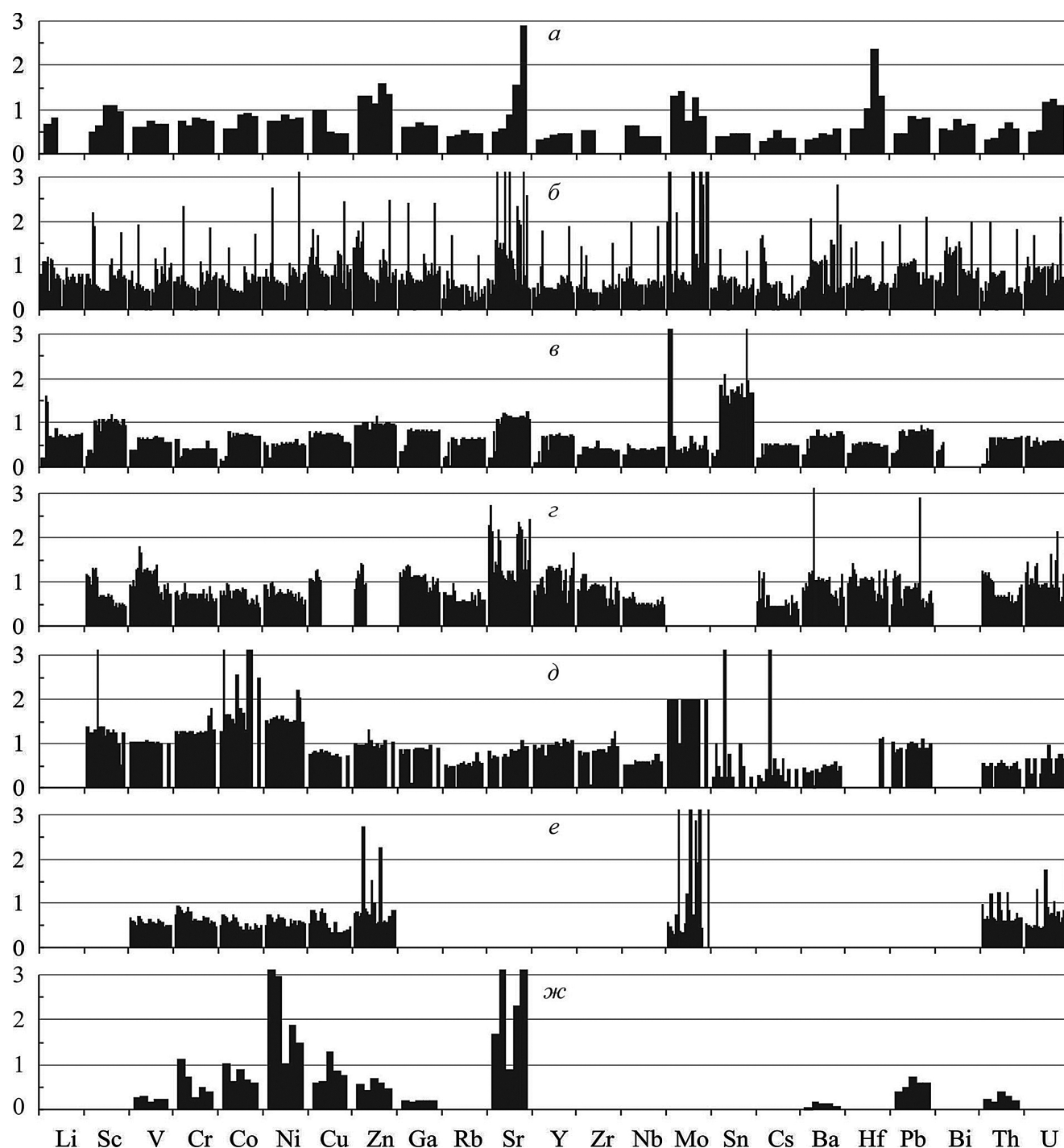


Рис. 2. Нормированное на ПААС содержание редких и рассеянных элементов (без РЗЭ) в сопочном иле грязевых вулканов в разных районах мира (число столбиков в ячейке каждого элемента соответствует числу проанализированных проб): *а* — Керченский п-ов; *б* — Северо-Западный Кавказ; *в* — о-в Сахалин; *г* — Джунгарский бассейн; *д* — Андаманские о-ва; *е* — Кадисский залив; *жс* — Восточное Средиземноморье

Bracciali et al., 2007] хорошо видно, что сопочные илы ГВ Андаманских о-вов действительно содержат больше, чем сопочные илы, других рассматриваемых нами объектов, продуктов пород основного состава (так называемый основной компонент на диаграмме Cr/Th–Th/Sc) (рис. 3). Возможно, что свойственное им повышенное против ПААС среднее содержание Sc, Cr, Co, Ni, Mo и Sn объясняется этим обстоятельством. Точки сопочных илов ГВ большинства других объектов располо-

жены на графиках Th–La–Sc и Ni–V–10Th приблизительно посередине между полями основных и кислых пород, тяготея при этом и к референтной точке ПААС. Таким образом, они сложены, по всей видимости, более зрелым/кислым материалом и по геохимическим характеристикам сопоставимы с обычными осадочными породами.

Средняя сумма РЗЭ в сопочных илах исследуемых нами объектов варьирует от ~103–106 г/т (ГВ Булганак и грязевые вулканы о-ва Сахалин) до

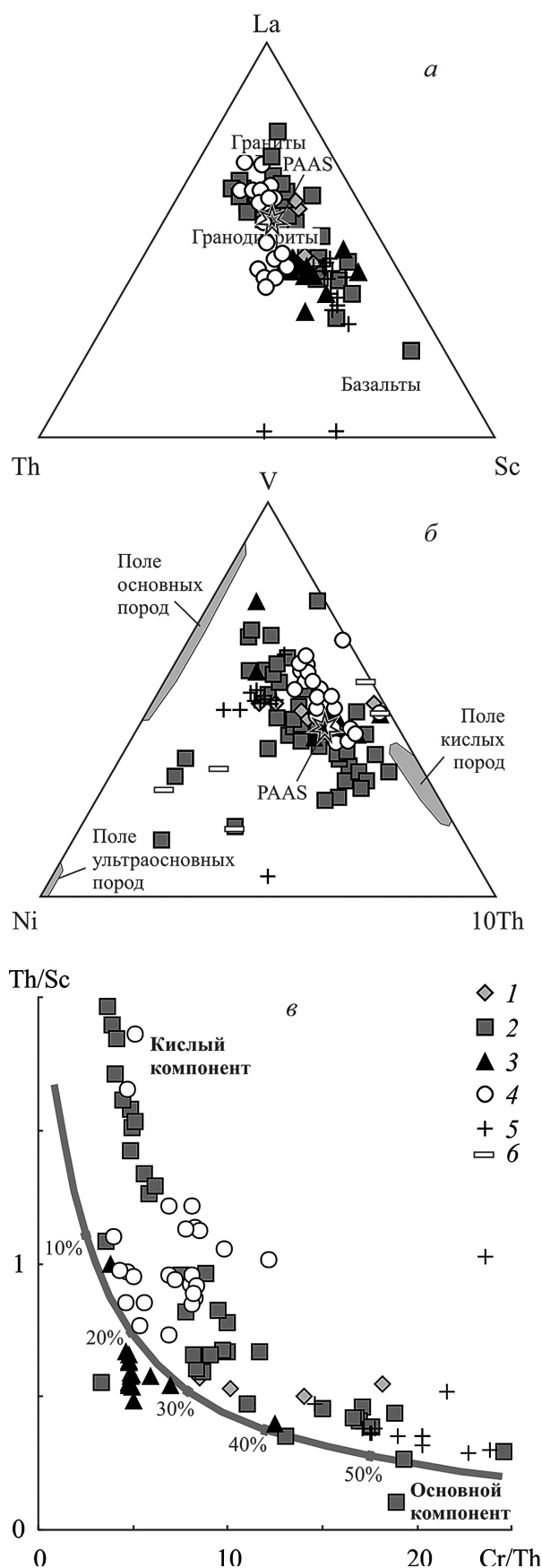


Рис. 3. Положение точек состава сопочных илов грязевых вулканов из разных районов мира на диаграммах Th–La–Sc (а), Ni–V–10Th (б) и Cr/Th–Th/Sc (в): 1 — Керченский п-ов; 2 — Северо-Западный Кавказ; 3 — о-в Сахалин; 4 — Джунгарский бассейн; 5 — Андамские о-ва; 6 — Восточное Средиземноморье

~180 г/т (Восточная Ява). Существенно отличаются также средние величины основных параметров нормированных на хондрит спектров распределения РЗЭ. Так, минимальная средняя величина $(La/Yb)_N$, равная $5,1 \pm 0,6$, характерна для сопочных илов ГВ о-ва Сахалин. Это позволяет предполагать, что в составе сопочных илов здесь велика роль продуктов основных магматических пород, но в то же время значение Eu/Eu^* среднее составляет здесь всего $0,64 \pm 0,02$, что не свойственно основным породам. Несколько выше параметр $(La/Yb)_N$ в сопочных илах ГВ Джунгарского бассейна ($6,5 \pm 0,8$), тогда как максимальное среднее значение $(La/Yb)_N$, равное $22,3 \pm 4,8$, характерно для продуктов ГВ Восточной Явы⁴. Это существенно выше, чем для средних архейских гранитов по данным работы [Condie, 1993]. Средние величины отрицательной европиевой аномалии в исследованной нами выборке варьируют от $0,45 \pm 0,10$ (ГВ Восточной Явы) до $0,80 \pm 0,08$ (ГВ в Кадисском заливе). В целом же сходство спектров распределения РЗЭ в референтных осадочных образованиях (PAAS [Taylor, McLennan, 1985], ES⁵ [Haskin, Haskin, 1966], NASC [Gromet et al., 1984], RPSC [Мигдисов и др., 1994], WRAS и WRAC [Bayon et al., 2015]. Сравнение среднего речного взвешенного стока [Goldstein, Jacobsen, 1988], MUQ [Kamber et al., 2005], среднего взвешенного материала мировых рек [Viers et al., 2009] и сопочных илов ГВ всех исследованных нами объектов (рис. 4) дает основание полагать, что в составе последних нет какой-либо примеси материала магматических/мантийных эманаций.

На диаграмме Ce/La–Zr/Y (рис. 5) все точки составов образцов сопочных илов ГВ из различных районов мира, представленные в нашей базе данных, попадают в поле С, т.е. в поле терригенных и туфогенных осадочных образований окраин континентов [Деков, 1994; Морозов, 2000]. Иными словами, это типичные терригенные образования без каких-либо примесей магматического/мантийного материала.

Заключение. Проанализированные нами данные о микроэлементном составе сопочных илов ГВ в разных районах мира подтверждают представления о том, что в них признаки/следы воздействия мантийного/ювенильного компонента

⁴ Впрочем, облик нормированных на хондрит спектров РЗЭ в сопочном иле ГВ Восточной Явы позволяет предполагать некорректность аналитических данных, приведенных в работе [Agustawijaya et al., 2017].

⁵ ES — средний европейский сланец [Haskin, Haskin, 1966], NASC — составная проба североамериканских глинистых сланцев [Gromet et al., 1984], RPSC — составная проба глинистых пород Русской платформы [Мигдисов и др., 1994], WRAS и WRAC. Средний алевроит мировых рек и Средняя глина мировых рек соответственно [Bayon et al., 2015], MUQ — Средний тонкозернистый аллювиальный осадок Северо-Восточной Австралии [Kamber et al., 2005].

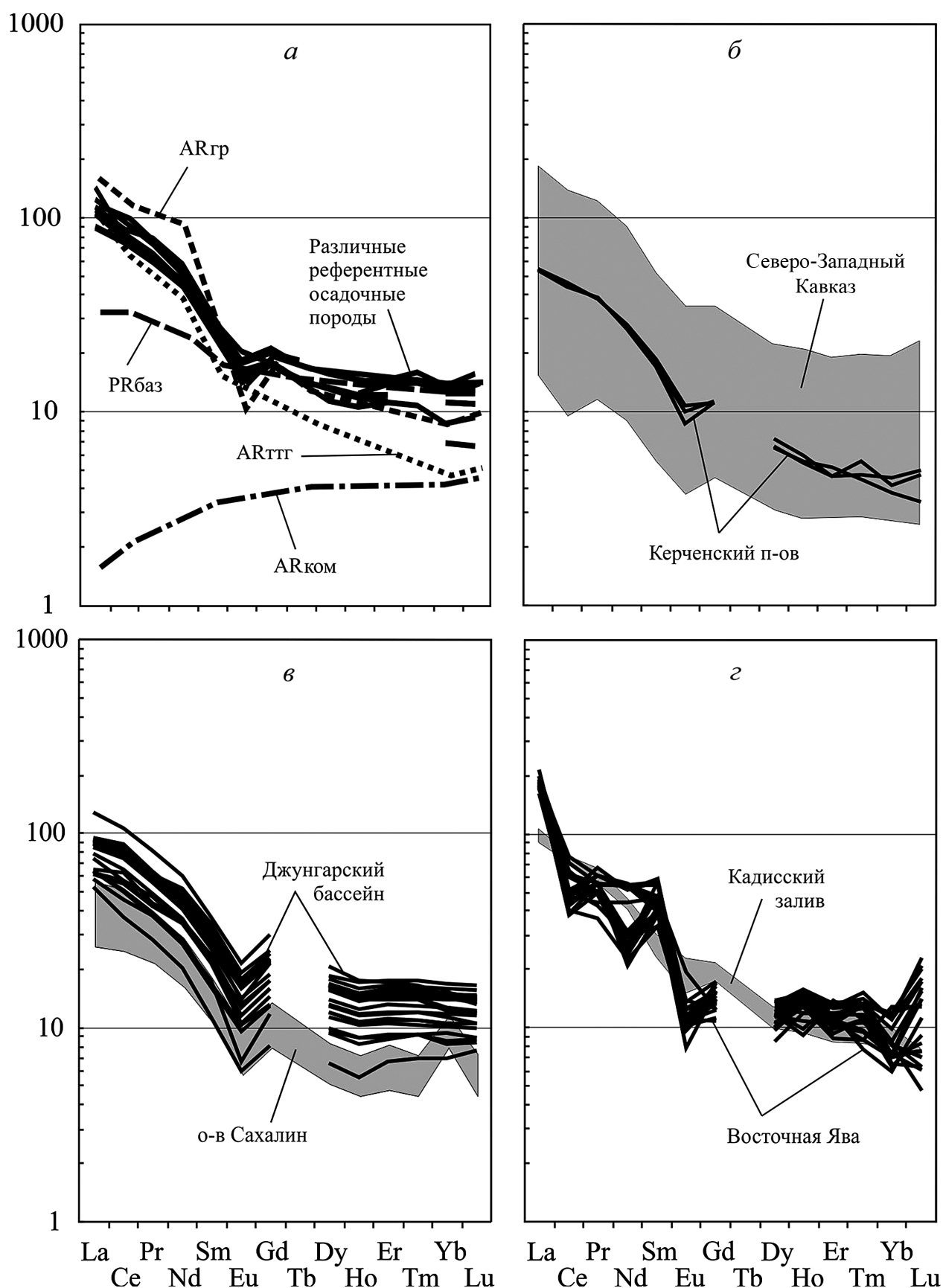


Рис. 4. Нормированное на хондрит распределение РЗЭ в сопочных илах грязевых вулканов в разных районах мира: а — различные типы магматических (ARгр — архейские граниты, ARттг — породы архейских тоналит-трондьемит-гранитных ассоциаций, ARком — архейские коматииты, PRбаз — протерозойские базальты (все по [Condie, 1993]) и осадочных пород, черные линии PAAS, ES, NASC, RPSC, WRAS, WRAC, средний речной сток, MUQ, средний мировой речной сток); б — грязевые вулканы Керченского п-ва и Северо-Западного Кавказа; в — грязевые вулканы о-ва Сахалин и Джунгарского бассейна; г — грязевые вулканы Кадисского залива и Восточной Явы

не наблюдаются. Это следует и из сопоставления особенностей распределения ряда редких и рассеянных элементов в сопочных илах и PAAS, выступающего в большинстве современных публикаций как референтный геохимический объект для тонкозернистых/глинистых пород. На это же указывают и особенности нормированных на хондрит спектров распределения редкоземельных элементов в сопочных илах ГВ различных районов мира, не имеющие принципиальных отличий от распределения лантаноидов в «обычных осадочных породах/отложениях».

Благодарности. Авторы признательны Е.И. Пижанковой, Д.Ю. Волкову, С.Н. Волковой, Л.И. Евдокимову, А.А. Клювиткину, Г.И. Комарову, А.Г. Курилко, В.И. Русанову, Н.Н. Русановой, и А.В. Шевченко за помощь в отборе проб, Н.С. Глушковой — за выполнение иллюстраций.

Финансирование. Интерпретация результатов выполнена в рамках госзадания ИО РАН № 0149-2019-0007. Полевые работы проведены при поддержке РФФИ (проект 18-05-00818).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деков В. Гидротермальное осадкообразование в Тихом океане. М.: Наука, 1994. 208 с.
- Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
- Летников Ф.А. Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования // Смирновский сборник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. С. 63–98.
- Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких и рассеянных элементов в сопочном иле грязевых вулканов Северо-Западного Кавказа // Геохимия. 2020. Т. 65, № 9. С. 886–910.
- Мельников О.А. О динамике и природе Пугачевской группы газоводокластитовых («грязевых») вулканов на Сахалине по данным визуальных наблюдений и орогидрографии // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 47–59.
- Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеан. геология. 1989. № 3. С. 42–48.
- Мельчаков Ю.Л., Козаренко А.Е., Суриков В.Т. Геохимический эффект грязевого вулканизма Булганакского сопочного поля (Крым) // Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы. М.: ГЕОХИ РАН, 2017. С. 355–360.
- Мигдисов А.А., Балашов Ю.А., Шарков И.В. и др. Распространенность редкоземельных элементов в главных литологических типах пород осадочного чехла Русской платформы // Геохимия. 1994. № 6. С. 789–803.
- Морозов О.Л. Геохимия и литология пород аккреционной призм хребта Пекульней (Центральная Чукотка) // Литология и полезные ископаемые. 2000. № 2. С. 192–213.
- Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Веникова А.Л., Пестрикова Н.Л. Элементы-примеси в современной сопочной брекчии грязевых вулканов о. Сахалин // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. Вып. 25. № 1. С. 19–30.

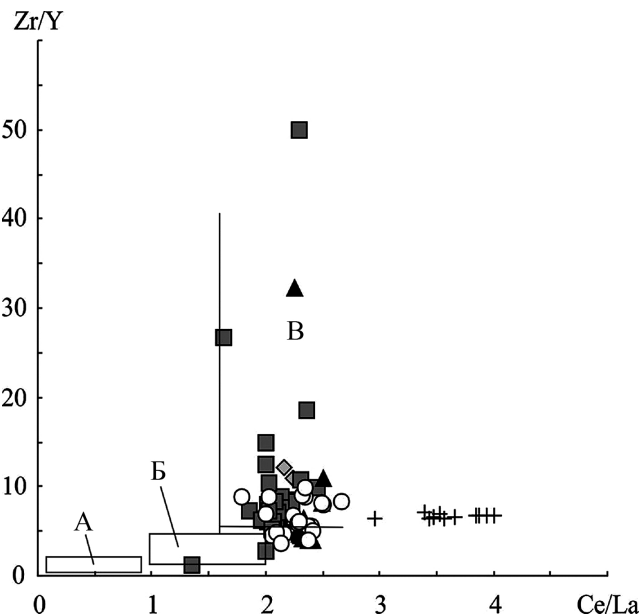


Рис. 5. Положение фигуративных точек состава сопочных илов ГВ в различных районах мира на диаграмме Ce/La–Zr/Y. Поля, по [Морозов, 2000]: А — гидротермальных, диагенетических и смешанных металлоносных осадков Тихого океана; Б — средние пелагические глины Мирового океана; И — терригенные и туфогенные осадки окраин континентов. Условные обозначения см. на рис. 4

Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Грязевые вулканы острова Сахалин (газогеохимия и минералогия) // Региональные проблемы. 2009. № 11. С. 39–44.

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

Тверитинова Т.Ю., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В. Структурная позиция и особенности строения и формирования грязевого вулкана горы Карабетова // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 2. С. 106–122.

Федоров Ю.А. Изотопный состав как индикатор обстановки генерации водных и углеводородных флюидов грязевых вулканов Таманского полуострова // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. С. 319–323.

Федоров Ю.Н., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. Систематика элементов-примесей в продуктах извержений ряда грязевых вулканов Керченско-Таманской области (по данным ICP-MS) // Литосфера. 2005. № 5. С. 117–123.

Хаустов В.В. О глубинных водах Южно-Каспийской впадины // Уч. зап. Электр. науч. журн. Курского государственного университета. 2011. № 1 (18). С. 241–248.

Холодов В.Н. Грязевые вулканы: распространение и генезис // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.

Холодов В.Н. О происхождении грязевых вулканов // Геология і корисні копалини Світового океану. 2019. Т. 15, № 4. С. 57–80.

Шнюков Е.Ф., Алиев Ад.А., Рахманов Р.Р. Грязевой вулканизм Средиземного, Черного и Каспийского морей: специфика развития и проявления // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2017. № 2. С. 5–25.

Шнюков Е.Ф., Гнатенко Г.И., Нестеровский В.А., Гнатенко О.В. Грязевой вулканизм Керченско-Таманского региона. Киев: Наукова думка, 1992. 200 с.

Шнюков Е.Ф., Непребская Е.Я. Глубинное геологическое строение грязевых вулканов Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 2. С. 66–79.

Agustawijaya D.S., Karyadi K., Krisnayanti B.D., Sutanto S. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java–Indonesia // Open Geosci. 2017. Vol. 9. P. 689–706.

Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C. et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2015. Vol. 170. P. 17–38.

Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. Sedimentary provenance and petrogenesis // Perspectives from petrography and geochemistry / Ed. by J. Arribas, S. Critelli, M.J. Johnsson // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 2007. N 420. P. 73–93.

Carvalho L., Monteiro R., Figueira P. et al. Rare earth elements in mud volcano sediments from the Gulf of Cadiz, South Iberian Peninsula // Sc. Total Environ. 2019. Vol. 652. P. 869–879.

Carvalho L., Monteiro R., Figueira P. et al. Vertical distribution of major, minor and trace elements in sediments from mud volcanoes of the Gulf of Cadiz: evidence of Cd, As and Ba fronts in upper layers // Deep Sea Res. Pt I. Oceanographic Res. Pap. 2018. Vol. 131. P. 133–143.

Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. Vol. 104, N 1–4. P. 1–37.

Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 97, N 3–4. P. 256–267.

Dimitrov L.I. Mud volcanoes — the most important pathway for degassing deeply buried sediments // Earth Sci. Rev. 2002. Vol. 59. P. 49–76.

Gardner J.M. Gulf of Cadiz/Moroccan margin, mud diapirism and mud volcanism study, introduction and geological setting // Multidisciplinary Study of the Geological Processes on the North East Atlantic and Western Mediterranean Margins. IOC Technical Ser. 56. 2000. UNESCO. 101 p.

Gardner J.M. Mud volcanoes revealed and sampled on the western Moroccan continental margin // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. P. 339–342.

Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Rare earth elements in river waters // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. Vol. 89. P. 35–47.

Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. Vol. 48. P. 2469–2482.

Gutscher M.A., Dominguez S., Westbrook G. et al. Tectonic shortening and gravitational spreading in the Gulf of Cadiz accretionary wedge: Observations from multi-beam bathymetry and seismic profiling // Marine Petrol. Geol. 2009. Vol. 26. P. 647–659.

Haskin M.A., Haskin L.A. Rare earths in European shales: a redetermination // Science. 1966. Vol. 154. P. 507–509.

Ivanov M.A., Hiesinger H., Erkeling G., Reiss D. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: evidence for the ancient ocean // Icarus. 2014. Vol. 228. P. 121–140.

Kamber B.S., Greig A., Collerson R.D. A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2005. Vol. 69. P. 1041–1058.

Kopf A.J. Significance of mud volcanism // Rev. Geophys. 2002. Vol. 40, N 2. 1005. DOI: 10.1029/2000RG000093

Lykousis V., Alexandri S., Woodside J. et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander Mountains (Eastern Mediterranean Sea) // Marin. Petrol. Geol. 2009. Vol. 26. P. 854–872.

Manga M., Brumm M., Rudolph M.L. Earthquake triggering of mud volcanoes // Marin. Petrol. Geol. 2009. Vol. 26. P. 1785–1798.

Masclé J., Mary F., Praeg D. et al. Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz // Geo. Marin. Lett. 2014. Vol. 34. P. 89–110.

Mazzini A., Etiopie G. Mud volcanism: An updated review // Earth Sci. Rev. 2017. Vol. 168. P. 81–112.

Mazzini A., Svensen H., Planke S. et al. When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan // Marin. Petrol. Geol. 2009. Vol. 26. P. 1704–1715.

Mhammedi N.A., El Moumni B., El Hmaidi A. et al. Mineralogical and geochemical study of mud volcanoes in north Moroccan atlantic margin // African J. Environ. Sci. and Technology. 2008. Vol. 2, N 11. P. 387–396.

Nakada R., Takahashi Y., Tsunogai U. et al. A geochemical study on mud volcanoes in the Junggar Basin, China // Appl. Geochem. 2011. Vol. 26. P. 1065–1076.

Pinheiro L.M., Ivanov M.K., Sautkin A. et al. Mud volcanism in the Gulf of Cadiz: results from the TTR-10 cruise // Marin. Geol. 2003. Vol. 195. P. 131–151.

Qiu N.S., Zhang Z.H., Xu E.S. Geothermal regime and Jurassic source rock maturity of the Junggar Basin, Northwest China // J. Asian Earth Sci. 2008. Vol. 31. P. 464–478.

Shakirov R.B., Sorochinskaja A.V., Syrбу N.S. et al. Geochemical features of Sakhalin Island mud volcanoes // Vietnam J. Earth Sci. 2018. Vol. 40, N 1. P. 56–69.

Skinner J.A., Mazzini A. Martian mud volcanism: terrestrial analogs and implications for formational scenarios // Marin. Petrol. Geol. 2009. Vol. 26. P. 1866–1878.

Sokol E., Kokh S., Kozmenko O. et al. Mineralogy and geochemistry of mud volcanic ejecta: A new look at old issues (a case study from the Bulganak Field, Northern Black Sea) // Minerals. 2018. Vol. 8. 344. DOI: 10.3390/min8080344

Talas E., Duman M., Kucuksezgin F. et al. Sedimentology and geochemistry of mud volcanoes in the Anaximander Mountain Region from the Eastern Mediterranean Sea // Marin. Poll. Bull. 2015. Vol. 95. P. 63–71.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.

Ten Veen J.H., Woodside J.M., Zitter T.A. et al. Neotectonic evolution of the Anaximander Mountains at the junction of the Hellenic and Cyprus arcs // Tectonophysics. 2004. Vol. 391, N 1. P. 35–65.

Tinivella U., Giustianiani M. An overview of mud volcanoes associated to gas hydrate system // Earth and Planet. Sci. «Updates in Volcanology — New Advances in Understanding Volcanic Systems». 2012. DOI: 10.5772/51270.

Viers J., Dupre B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407. P. 853–868.

Vignesh A., Ramanujam N., Rasool Q., Swapan K.B. Geochemical evidence for provenance, tectonic settings and presence of gas hydrate in mud volcano sediments of Andaman Islands // *Oil Gas Res.* 2016. Vol. 2, N 111. DOI: 10.4172/ogr.1000111

Viola G., Andreoli M., Ben-Avraham Z. et al. Offshore mud volcanoes and onland faulting in southwestern Africa: neotectonic implications and constraints on the regional stress field // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 231. P. 147–160.

Wan Z., Shi Q., Yuan Y. et al. Sedimentary and geochemical signatures of mud volcanoes in the southern margin of the Junggar Basin, Northwestern China // *J. Earth Sci.* 2015. Vol. 27, N 2. DOI: 10.1007/s12583-015-0660-6.

Поступила в редакцию 27.01.2021

Поступила с доработки 28.01.2021

Принята к публикации 28.01.2021