

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ КРЕМНЕКИСЛЫХ ПОРОД КОЛЧЕДАНОНОСНЫХ ПАЛЕОВУЛКАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПЕТРОГЕНЕЗА

© 2018 г. А. М. Косарев

*Институт Геологии УФИЦ РАН, г. Уфа*

Кислые породы постоянно участвуют в геологическом строении колчеданосных вулканических комплексов Магнитогорской палеоостроводужной мегазоны Южного Урала. В геологических разрезах рудоносных вулканических сооружений колчеданосные залежи обычно приурочены к толщам кислых пород и зонам контакта последних с подстилающими эффузивными базальтами и вулканогенно-осадочными породами. В связи с устойчивым характером этой ассоциации, присутствие кислых пород на изучаемой площади обоснованно считалось положительным фактором прогнозной оценки на колчеданное оруденение [9, 22, 25, и др.]. Однако само по себе присутствие кислых эффузивных, экструзивно-субвулканических и интрузивных пород в вулканических комплексах далеко не всегда коррелируется с присутствием рудных залежей, и тем более с их составом, что заставляет предполагать более сложные связи оруденения с вулканизмом [15, 17].

Задачей данной работы является петролого-геохимическая классификация кислых пород колчеданосных вулканических комплексов на основании обобщения опубликованных и фондовых геологических и геохимических материалов, касающихся большинства колчеданосных рудных районов Магнитогорской мегазоны.

Колчеданосные комплексы входят в состав реконструированных палеовулканических зон, среди которых в Магнитогорской мегазоне выделены следующие (с 3 на В): 1) Вознесенско-Присакмарская зона аккреции и серпентинитового меланжа (ГУР); 2) фронтальная островная дуга; 3) развитая островная дуга; 4) зона внутридугового спрединга; 5) остаточная тыловая островная дуга; 6) зона задугового спрединга [7, 17, 18].

Главным признаком, на основании которого проведена группировка палеовулканических колчеданосных комплексов, соответствующих им рудно-магматических систем, служили формационная и сериальная принадлежность, возраст рудоносных свит, толщ, комплексов и их геодинамическая позиция. С учетом составов вулканических ассоциаций, слагающих конкретные вулканические комплексы, минералого-геохимических характеристик руд отдельных месторождений, соотношений в рудах Cu, Zn, Pb, Ba, для Магнитогорской мегазоны выделены 15 типов колчеданосных комплексов. С запада на восток и с севера на юг это следующие типы: 1 — Ивановский, 2 — Бурибайский, 3 — Баймакский, 4 — Макан-Октябрьский, 5 — Гайский, 6 — Подольский, 7 — Восточно-Подольский, 8 — Джусинский, 9 — Домбаровский, 10 — Сибайский, 11 — Учалинский, 12 — Верхнеуральский, 13 — Александринский, 14 — Ащевутацкий, 15 — Бакр-Узякский. Геодинамическая позиция рудных районов и подсчитанные запасы Cu и Zn в тыс. т приведены на рис. 1.

На основании обобщения петролого-геохимических, геолого-стратиграфических и металлогенических материалов выделяются 4 группы кислых пород: 1 — Ивановско-Бурибайская; 2 — Баймакско-Гайско-Подольская; 3 — Сукраковско-Джусинская; 4 — Карамалыташко-Сибайско-Верхнеуральско-Александринская.

**Ивановско-Бурибайская группа кислых пород** изучена в Вознесенско-Присакмарской и в Акъяр-Бурибайской структурно-формационных зонах, которые по данным геодинамических реконструкций [6, 13, 17, 34] представляют собой фрагмент фронтальной островной дуги. В геологических разрезах вмещающих колчеданное оруденение ивановского и бурибайского типов преобладают вулканы бонинитовой и толеитовой островодужной, в меньшей мере, умеренно-щелочной серий в основных породах и известково-щелочной и умеренно-щелочной серий в кислых породах.

*Ивановский колчеданосный комплекс* ( $D_{1e_2}$ ?). Ивановский интрузивно-вулканический комплекс слагает серпентинизированные ультрабазиты преимущественно гарцбургитового, реже дунитового составов; базальты умеренно-щелочной, толеитовой и бонинитовой серий; бониниты, кислые породы эффузивно-пирокластической и тейфroidной фаций, габброиды и диориты, пла-

№№ пп	Рудовмещающие комплексы	Возраст	Формация	Петрохимическая серия	Тип оруденения	Запасы в вулканических комплексах [8]					
						10000	8000	6000	4000	2000	0
1	Ивановский	D <sub>1</sub> e	У+Б-Р	ДГ+Т-БОН	Co-Cu	80					
2	Бурибайский	D <sub>1</sub> e <sub>2</sub> <sup>1</sup>	Б-Р	Т-БОН-ИЩ	Cu>Zn	2810					
3	Баймакский	D <sub>1</sub> e <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Б-А-Д-Р	ИЩ	Zn>Cu+Au	1047					
4	Маканский	D <sub>1</sub> e <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Б-А-Д-Р	ИЩ-ТОД	Cu>Zn	700					
5	Гайский	D <sub>1</sub> e <sub>2</sub>	Б-Р, Б-А-Д-Р	ИЩ-ТОД-БОН ?	Cu>Zn	10041					
6	Подольский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub> <sup>1</sup>	Б-Р, Б-А-Д-Р (г)	ТОД-ПИЩ	Cu>Zn	3070					
7	Джусинский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub>	Б-А-Д-Р	ШОШ-ИЩ	Zn-Cu-Pb	657					
8	Восточно-Подольский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub> <sup>2</sup>	ТД-Р	ПИЩ-ШОШ	Zn-Cu-Pb	164					
9	Домбаровский	D <sub>1</sub> e	Б	ТО	Cu	1372					
10	Учалинский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub> <sup>1</sup>	Б-Р	ТОД	Zn>Cu	9542					
11	Сибайский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Б-Р	ТОД	Zn>Cu	2927					
12	Верхнеуральский	D <sub>2</sub> ef <sub>2</sub> <sup>2</sup> -zv <sub>1</sub>	Б-А-Д-Р	ПТОД-ИЩ	Zn>Cu+Pb	6900					
13	Александринский	D <sub>2</sub> ef <sub>1</sub>	Б-Р	ТОД-ИЩ-СЩ	Zn-Cu-Pb	559					
14	Ащебутакский	D <sub>2</sub> ef <sub>2</sub> <sup>2</sup> -zv <sub>1</sub>	Б-Р	ТОД-ИЩ-СЩ	Zn>Cu	200					

10000 8000 6000 4000 2000 0  
тысяч тонн

**Рис. 1. Рудовмещающие комплексы и колчеданное оруденение Магнитогорской мегазоны Южного Урала**

**Сокращенные названия, формации:** У — ультрабазитовая, Б-Р — базальт-риолитовая, Б-А-Д-Р — базальт-андезит-дацит-риолитовая, (г) — гибридная, ТД-Р — трахидацит-риолитовая, Б — базальтовая. **Петрохимические серии:** ДГ — дунит-гарцбургитовая, Т — толеитовая, БОН — бонинитовая, ИЩ — известково-щелочная, ТОД — толеитовая островодужная, ПИЩ — переходная известково-щелочная, ШОШ — шошонитовая, ТО — толеитовая океаническая, ПТОД — переходная от толеитовой островодужной, СЩ — субщелочная.

гиогранитоиды субвулканической дайковой фаций. По современным материалам [1, 21] ивановский комплекс имеет раннедевонский возраст.

Кислые породы ивановского колчеданоносного комплекса в большинстве своем относятся к нормально щелочному натриевому типу известково-щелочной серии, реже — к такому же типу умеренно-щелочной серии. В умеренно-щелочных андезидацитах, дацитах (SiO<sub>2</sub> 63.1–65.59%) Na<sub>2</sub>O достигает 7.95–8.21%, K<sub>2</sub>O — 0.04–0.42%. Присутствие ультранизких (<0.1%) количеств K<sub>2</sub>O при высоких Na<sub>2</sub>O свидетельствует об интенсивной альбитизации плагиоклазов, а также выносе K<sub>2</sub>O из основной массы вулканитов при девитрификации и гидротермальном натровом метасоматозе, связанным, возможно, с рудогенезом. Большинство известково-щелочных кислых пород имеют дацит-риодацитовый состав. Количества Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> преимущественно <15%, в риолитах 12%, в дацитах до 18.9%.

Все кислые породы ивановского подтипа обнаруживают обогащение ЛРЗЭ и обеднение ТРЗЭ, повышенные концентрации Zr (73.8–155 г/т). На спайдердиаграммах кислых пород обнаружены негативные аномалии Nb, Eu, Ba, положительные — Sr, Zr. Концентрации Ba варьируют от 9 до 164.4 г/т, Sr 57.4–312.6 г/т, Nb 1.8–4.5 г/т, Yb 1.09–2.12 г/т.

*Бурибайский вулканический комплекс* позднеэмского возраста (D<sub>1</sub>e<sub>2</sub>br). Является нижней подсвитой баймак-бурибаевской свиты. По конодонтовой фауне он соответствует зонам serotinus – patulus [21]. Мощность комплекса превышает 1000 м.

Нижняя подсвита баймак-бурибаевской свиты (D<sub>1</sub>ems b–br<sub>1</sub>) классифицируется как дифференцированная базальт-риолитовая субформация, соответствует бурибаевскому вулканическому комплексу и делится на три толщи: нижнюю — долерито-базальтовую (br<sub>1</sub><sup>1</sup>), среднюю — пиллоу-базальт-вариолитовую (br<sub>1</sub><sup>2</sup>) и верхнюю базальт-риодацитовую (br<sub>1</sub><sup>3</sup>). Повышенный интерес к вулканитам этой свиты, обусловлен ее высокой колчеданоносностью и принадлежностью к ранним островодужным (или предостроводужным) [6] супрасубдукционным образованиям. Дополнительный интерес к бурибаевскому вулканическому комплексу вызван выделением его в составе пород, принадлежащих к толеитовой и бонинитовой сериям [6, 8, 31, 33, 34].

Основание разреза, сопоставимое с олистостромовой толщей ивановского комплекса в Акьяр-Бурибайской зоне скважинами не вскрыто. В основании изученного разреза бурибайского комплекса залегает толща долерито-базальтов (D<sub>1</sub>e<sub>2</sub>br<sub>1</sub><sup>1</sup>), которая знаменует начальный этап формирования энсиматической фронтальной островной дуги [6, 13, 17, 33, 34]. В составе нижней толщи (br<sub>1</sub><sup>1</sup>) преобладают базальты умереннощелочной серии с колебаниями ΣK<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 5.62–6.56%

и широкими вариациями количества  $MgO$  от низких ( $MgO$  4.2%) до высоких ( $MgO$  8.4–9.1%), свидетельствующими, скорее всего, о фракционировании оливина.

В кислых породах собственно *бурибайского комплекса* диапазон колебаний  $K_2O$  в эффузивных породах варьирует от 0.05 до 1.68%,  $Na_2O$  от 4.3 до 8.65%. В наиболее щелочных разновидностях обнаруживаются повышенные количества РЗЭ и высокое значение  $La/Yb$ , что свидетельствует о первичномагматической умереннощелочной специфике этих пород. Концентрации Zr в кислых породах бурибайского комплекса варьируют от 47 до 84 г/т, что сопоставимо с аналогичными породами толеитовой и бонинитовой серий островных дуг Тонга-Кермадек и Южно-Сандвичевой [24], содержания Sr колеблются от 41–211 г/т, Ba — 12–19 г/т, Nb — 1.6–3.3 г/т, Yb — 0.62–1.8 г/т.

В вариолях бонинитовых вариолитов присутствует кислое стекло в сочетании с кварц-альбитовым агрегатом. Состав кислого стекла и кварц-альбитового агрегата, содержащих вторичные минералы и поздний клинопироксен варьирует в следующих пределах масс. %:  $SiO_2$  64.7–74.36,  $Al_2O_3$  20.58–23.8,  $MgO$  0.06–2.1,  $CaO$  0.2–2.58,  $Na_2O$  6.07–11.37,  $K_2O$  0.04–3.4. От кремнекислых пород бурибайского комплекса состав вариолей отличается повышенными глиноземистостью, суммарной щелочностью, натриевостью и в отдельных случаях, калиевостью, что позволяет считать вариоли аналогами субщелочных натриевых кислых пород.

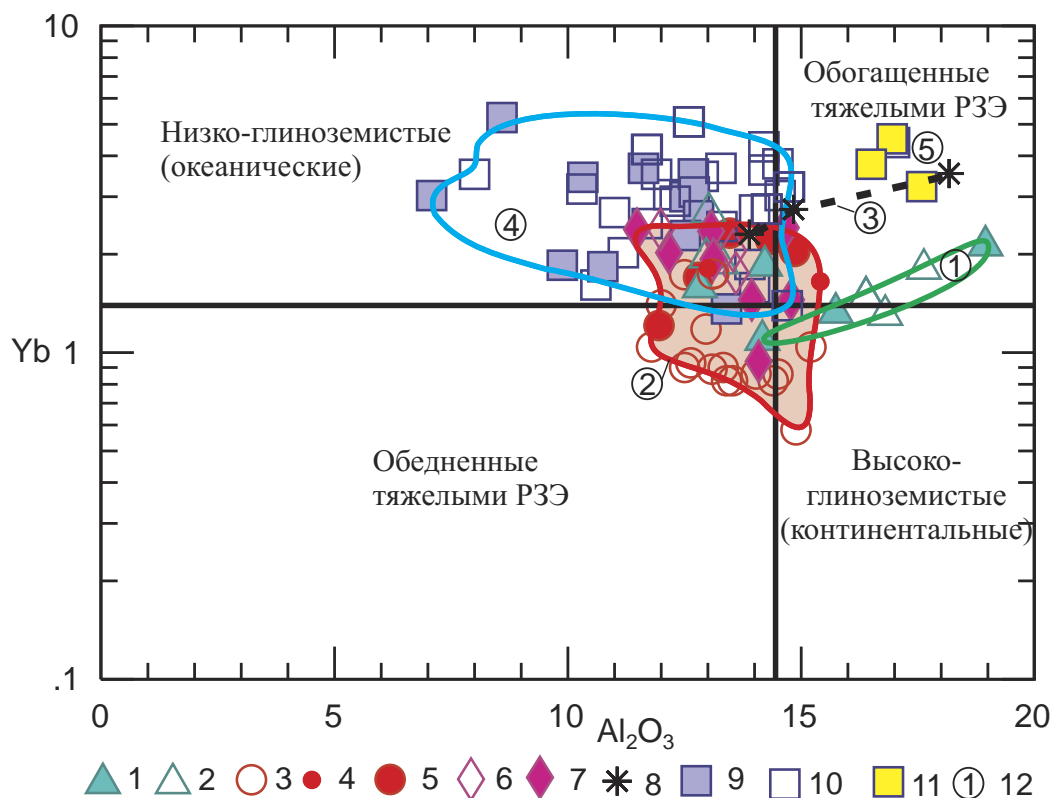
На диаграмме  $Al_2O_3 - Yb$  [2] (рис. 2) кислые породы ивановско-бурибайской группы частично сконцентрированы в области сочленения всех 4-х полей (поле 2), в которой присутствуют также кислые породы верхнетаналыкского комплекса Баймакского и Гайского рудных районов, Макан-Октябрьского и Подольского рудных полей. Выделяется также ассоциация кислых пород ивановско-бурибайской группы от низкоглиноземистых до высокоглиноземистых, в которой наблюдается одновременное возрастание концентраций  $Al_2O_3$  и Yb, свидетельствующее о наличии между ними положительной корреляционной зависимости.

Интрузивные породы, ассоциирующиеся с вулканитами ивановского и бурибайского комплексов по составу относятся к габбро-диоритовому ряду, субвулканические интрузии имеют дацит-риодацитовый, редко риолитовый состав, учитывая состав вариолей — продуктов ликвации бонинитовых магм [16], для кислых пород ивановского и бурибайского колчеданосных комплексов можно предположить следующие генетические модели образования кислых расплавов:

**I модель ликвационная**, кислые породы преимущественно умереннощелочной натриевой серии образуются в результате разделения магмы на две жидкие фазы кислую и основную; к этому типу могут быть отнесены кислые эффузивы третьей толщи бурибайского комплекса района д. Хворостянки ( $br_3$ ); можно предполагать, что в зависимости от структурных условий ликвация может происходить на *приповерхностном уровне*, результатом этого процесса являются бонинитовые вариолиты и кислые эффузивные породы умереннощелочной натриевой серии, второй более глубинный гиповулканический уровень, на котором формируются магнезиальные габброиды и диориты известные в урочище Шанхай [13, 16, 34] и на Восточно-Акъярском участке [Биков и др., 1973ф].

**II модель палингенного выплавления кислых магм из базальтов нижней коры**, касается эффузивных и субвулканических пород нормальной щелочности. Эти породы слагают кислую толщу урочища Каменная гора, Юбилейного и Бурибайского колчеданных рудных полей. По составу кислых пород этот тип близок к трондjemитам типа Литл-Порт острова Ньюфаундленд [20], образовавшихся в цоколе островной дуги.

**Баймакско-Гайско-Подольская группа кислых пород** участвует в сложении колчеданосных сооружений Баймакского и Гайского рудных районов и Макан-Октябрьского и Подольского рудных колчеданосных полей. В стратиграфическом отношении рудовмещающие толщи Баймакского рудного района, Макан-Октябрьского рудного поля и Гайского рудного района входят в состав верхней подсвиты баймак-бурибаевской свиты или верхнетаналыкского палеовулканического комплекса ( $D_1e_2^2$ ) [6]. В северной части Тубинско-Гайского пояса верхнетаналыкский комплекс непосредственно перекрывает бурибайский комплекс ( $D_1e_1^1$ ), что установлено в геологическом разрезе по р. Таналык севернее д. Хворостянки около 2 км. Проблематично положение нижней границы верхнетаналыкского комплекса в Гайском рудном районе, так как на этом участке, возможно, наращивание разреза вниз вулканитами бурибайского комплекса. На Подольском рудном поле верхнетаналыкский комплекс подстилает ирендыкскую свиту Южно-



**Рис. 2.** Особенности распределения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и Yb [2] в кислых породах колчеданосных комплексов Магнитогорской мегазоны

**Условные обозначения:** 1–7 — островодужного типа: 1 — Ивановский комплекс (Ишкининское рудное поле), 2 — бурибайский комплекс (Бурибайский рудный район); 3–5 — верхнетаналыкский вулканический комплекс: 3 — Баймакский рудный район, 4 — Макан-Октябрьское рудное поле, 5 — Гайский рудный район; 6–8 — южно-ирендыкский комплекс: 6 — суурганский вулканический подкомплекс, 7 — Подольское рудное поле; 8 — сукраковский комплекс, джусинский комплекс; 9–10 — субокеанического типа, карамалыташский вулканический комплекс: 9 — Сибайское колчеданосное рудное поле, Карамалыташская антиклиналь, Учалинское рудное поле, 10 — Александринский рудный район, Ашебутакский рудный район, Верхнеуральский рудный район, 11 — метасоматиты серицит-хлоритовые по кислым породам, Александринский район, 12 — номера полей кислых пород: 1 — субщелочные нартиевые кислые породы бурибайского комплекса; 2 — известково-щелочные островодужные кислые породы Тубинско-Гайского пояса; 3 — субщелочные и известково-щелочные кислые породы Сукраковско-Джусинской группы; 4 — известково-щелочные кислые породы субокеанического типа карамалыташского комплекса и его возрастных аналогов.

Ирендыкской зоны, что установлено в разрезе скважин 8501, 8502, на западном фланге Подольского кальдера-вулкана [27].

*Баймакский колчеданосный палеовулканический комплекс* представляет непрерывную базальт-андезит-дацит-риодацитовую формацию с довольно четким гомодромным характером эволюции вулканизма. Ассоциация вулканических пород Баймакского рудного района представляет собой полифациальный комплекс, в который входят следующие фации: подводная эффузивная и лаво-кластитовая, пирокластическая, тефроидная, экструзивная, субвулканическая, гиповулканическая. В нижней части разреза, по данным И.Б. Серавкина, представляющим нижний ритм вулканизма, преобладают вулканы базальт-андезит-базальтового состава, включающие диабазы, базальтовые пироксен-плагиоклазовые порфириты, вариолиты и локально проявленные кислые породы. В небольших объемах базальтовые порфириты присутствуют в толщах второго ритма вулканизма.

Вулканогенные толщи Баймакского, Макан-Октябрьского и Гайского колчеданосных вулканических комплексов базальт-андезит-дацит-риодацитового состава принадлежат преимущественно известково-щелочной магнезиальной серии.

В Баймакском районе в поле толеитовой серии попадают хлоритизированные базальты и более кислые породы с повышенными концентрациями  $\text{MgO}$  и  $\text{FeO}$ , в сочетании с высокими п.п.п.,

достигающими 8.23% и низкими (<1%) концентрациями  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , свидетельствующими о разложении плагиоклазов и участии околорудного метасоматоза в ее генезисе. Толеитовая магнезиальная островодужная серия присутствует южнее Баймакского района на северном фланге Макан-Октябрьского рудного поля, где вулканы базальтового состава залегают во второй толще (андезит-андезибазальтовой) рудовмещающего макан-октябрьского вулканического комплекса, вне метасоматического околорудного ореола [13]. В Гайском рудном районе к толеитовой островодужной серии принадлежат базальты нижней базальтовой толщи [23, 26]. В небольшом объеме, по данным автора, в разрезе скв. 3000 присутствуют и базальты умеренно-щелочной серии, что сближает эту толщу с нижней частью разреза бурибайского вулканического комплекса [13].

В Баймакско-Гайско-Подольской группе кислых пород наиболее детально эти породы изучены в составе баймакского колчеданоносного палеовулканического комплекса [17]. По составу кислые породы варьируют от дацитов до риодацитов, редко до риолитов в эффузивно-экструзивно-субвулканических породах и от гранодиоритов до плагиогранитов в гиповулканических интрузивных породах. Для них характерны низкие и умеренные концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (11.79–15.21%), умеренные и высокие количества  $\text{MgO}$  (0.63–4.6%), повышенные концентрации  $\text{FeO}_t$  (до 6.04–7.3%) в части субвулканических и интрузивных пород, повышенные концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  (2.5–5.6%), низкие  $\text{K}_2\text{O}$  (0.08–1.63%). По соотношениям  $\text{SiO}_2$  и суммарной щелочности все породы имеют нормальную щелочность в рамках преимущественно известково-щелочной серии. По содержаниям  $\text{MgO}$  установлено, что кислые породы, также как основные и средние относятся к магнезиальной известково-щелочной серии.

По соотношениям количеств  $\text{Rb}$  с  $\text{Y}$  и  $\text{Nb}$ ,  $\text{Rb}$  с  $\text{Yb}$  и  $\text{Ta}$ ,  $\text{Nb}$  с  $\text{Y}$  [32], фигуративные точки проанализированных кислых пород располагаются в поле составов надсубдукционных вулканических дуг.

По концентрациям  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Yb}$  (рис. 2) кислые эффузивные, субвулканические и интрузивные породы Баймакского рудного района занимают позицию, промежуточную между низкоглиноземистыми (океаническими) и высокоглиноземистыми (континентальными) трондьемитами [2]. Большая часть фигуративных точек на рассматриваемой диаграмме располагается в зоне низкоглиноземистых и лишь в единичных случаях высокоглиноземистых кислых пород. По содержаниям  $\text{Yb}$ , большинство фигуративных точек кислых пород Баймакского района располагается в поле составов обедненных тяжелыми РЗЭ, меньшая часть точек попадает в область обогащенных  $\text{Yb}$  составов пород. Граница между полями обогащенных ТРЗЭ и обедненных ими Д.Г. Арт [2] проходит на уровне концентраций  $\text{Yb}$  1.5 г/т. Наиболее заметно обогащены  $\text{Yb}$  интрузивные породы плагиогранитного и гранодиоритового составов, в которых концентрации  $\text{Yb}$  варьируют от 1.4 до 1.74 г/т.

На спайдердиаграммах на графиках нормированных значений РЗЭ виден нисходящий от легких к тяжелым РЗЭ характер вариационных кривых, свидетельствующий об обогащении пород ЛРЗЭ и обеднении ТРЗЭ. Такой тип вариационных кривых выдержан и для эффузивных пород дацитового и риодацитового составов, для большей части экструзивно-субвулканических и интрузивных пород.

Изредка среди кислых интрузивных и экструзивно-субвулканических пород встречаются разновидности с дефицитом ЛРЗЭ и некоторым обогащением ТРЗЭ или ровным толеитовым характером, нормированных по хондриту графиков распределения РЗЭ. В одной из проб (4186/421) экструзивных дацитов кварц-пироксен-роговообманково-плагиоклазовых по микронзондовым химическим анализам пироксенов (С.Ю. Чаженгиной, ИГ КарНЦ, г. Петрозаводск) предполагается их ксеногенная природа. Существенный объем включений с реликтами эндиопсидов, салитов и авгитов позволяет считать, что в результате гибридизации (загрязнения) кислых расплавов базитовыми интрузивными или пироксен-порфиоровыми породами предшествующих этапов магматизма может повышаться концентрация  $\text{MgO}$  и ТРЗЭ, и понижаться  $\text{SiO}_2$  и ЛРЗЭ. Гибридные кварц-пироксен-роговообманково-плагиоклазовые андезиты и андезидациты широко распространены в ирендыкской свите в Вишневоком и Подольском блоках Южно-Ирендыкской зоны [10]. Кислые породы дацит-риодацитового состава, ассоциирующиеся с кварцевыми андезитами имеют ровный «толеитовый» или с небольшим обогащением ЛРЗЭ характер графиков «порода – хондрит» [12]. Петрографические материалы по экструзивно-субвулканическим крупнокварцевым роговообман-

ково-плагиоклазовым риодацитам Подольского рудного поля и прилегающей к ней с северо-запада Суурганской площади, показывают присутствие в них пироксенов и ранней фазы плагиоклаза с признаками резорбции и дробления, наличие в протолочках по этим пробам хромита, позволяют предполагать участие процессов гибридизма в их петрогенезе. Таким образом, в верхней части разреза баймакского комплекса и в ирендыкской свите Подольско-Суурганской площади присутствуют кислые породы эффузивной и экструзивно-субвулканической фации в генезисе которых участвуют процессы гибридизма или «загрязнения» кислых магм материалом базитов предшествующих этапов магматизма.

Кислые породы Гайского рудного поля по соотношениям нормированных по хондриту концентраций РЗЭ обнаруживают слабое обогащение ЛРЗЭ, характерное для известково-щелочных серий. Все кислые породы обладают нормальной щелочностью. По соотношениям  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$ ,  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  кислые породы располагаются в полях известково-щелочной и толеитовой серий. Проявление толеитового тренда может быть связано с относительным обогащением пород железом в процессе рудогенеза. Этот вопрос нуждается в уточнении. По соотношениям  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Yb}$  (рис. 2) кислые породы гайского колчедановосного комплекса входят в единую группу островодужных вулканитов вместе с кислыми породами Подольского и Макан-Октябрьского колчедановосных комплексов. От баймакских кислых пород их аналоги в составе гайского, макан-октябрьского и подольского комплексов отличаются повышенными концентрациями Yb, образуя группу преимущественно низкоглиноземистых обогащенных ТРЗЭ кислых вулканитов.

**Сукраковско-Джусинская группа кислых пород** раннеэффельского возраста сформировалась в пределах тыловой островной дуги. Она имеет базальт-андезит-дацит-риолитовый состав и высокий уровень щелочности, варьирующий в интервале от известково-щелочной до шошонитовой серии. Кислые породы сукраковского комплекса варьируют по кислотности от андезитов до риолитов ( $\text{SiO}_2 - 64.14 - 75.58$  мас. %). На диагностической диаграмме  $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  вулканиты джусинского комплекса образуют ряд тефриты, абсорокиты, шошониты, латиты, трахиты, трахидациты при наличии составов нормальной щелочности.

Большая часть кислых пород сукраковского и джусинского комплексов (около 65%) относится к низкоглиноземистому типу ( $\text{Al}_2\text{O}_3 < 15\%$ ) и около 35% к высокоглиноземистому типу ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ ). По концентрациям Yb кислые породы этой группы относятся к типу обогащенному ТРЗЭ. Концентрации литофильных элементов Sr (81–1049 г/т), Ba (320–2413 г/т), Zr (114–355 г/т) имеют повышенные значения при широком диапазоне колебаний, понижены Nb (4.8–12 г/т) и La (8.9–30.1 г/т). Значения La/Yb имеют пониженные значения по сравнению с кислыми вулканитами западных поясов США по данным Эварта [29]. По соотношениям Sr–Rb,  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2 - \text{Zr}$  эти породы сопоставимы с островодужными кислыми вулканитами и приближаются к континентальным трондьемитам и гранофирам по данным Р. Колмана, М. Данато [29]. Повышенные концентрации Sr и Ba характерны для надсубдукционных образований [5].

На спайдердиаграммах порода/N-MORB хорошо проявлены негативные геохимические аномалии по Nb, Zr, Ti, указывающие на надсубдукционный островодужный тип вулканитов. Отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в кислых породах сукраковского подкомплекса варьирует от 0.7029 до 0.7046 [3], соответствуя интервалу мантийных составов. Отношение La/Yb для базальтов джусинского комплекса варьирует от 4.76 до 5.65, что близко к абсарокитам Камчатки [24]. Наличие на спайдердиаграмме основных пород порода/NMORB положительных аномалий Rb, Ba, Sr, Th, K, вероятно, свидетельствует об образовании магм в зоне обогащенного источника, возможно, содержащего флогопит [19].

**Карамалыташско-Сибайско-Верхнеуральско-Александринская группа кислых пород** сформировалась в зоне внутридугового спрединга Ирендыкско-Джусинской островной дуги. Базальты карамалыташского комплекса принадлежат преимущественно к толеитовой островодужной серии. В Учалинском и Верхнеуральском рудных районах в верхних толщах разрезов ( $kr_3 - kr_4$ ) базальты приобретают известково-щелочной уклон. Кислые породы эффузивной фации дацит-риодацитового состава относятся к толеитовой серии, либо к переходной от толеитовой к известково-щелочной [28, 14]. Известково-щелочные характеристики характерны для кислых пород субвулканической фации. В тыловой зоне, в составе *александринского комплекса* наряду с базальтами толеитовой

серии присутствуют базальтоиды и кислые породы известково-щелочной и умереннощелочной серий.

По соотношениям  $Al_2O_3 - Yb$  кислые породы карамалыташской группы практически полностью располагаются в поле «океанических» [2] низкоглиноземистых, обогащенных ТРЗЭ типов вулканитов. На спайдердиаграммах порода/хондрит все кислые породы Сибайского рудного поля, Карамалыташской антиклинали и Учалинского рудного поля обнаруживают дефицит ЛРЗЭ. На графике порода/NMORB четко проявлены негативные аномалии Nb. Концентрации Sr понижены. В Карамалыташской антиклинали содержания Sr 34.7–73 г/т, в окварцованных разновидностях ( $SiO_2$  77.3–84%) Sr — 3.16–11.7 г/т, что свидетельствует о его выносе. На Сибайском рудном поле Sr в кислых породах колеблется в интервале 29–47 г/т, что несколько ниже, чем в слабо измененных породах Карамалыташской антиклинали и, возможно, указывает на его частичный вынос из зоны рудообразования. В кислых породах Верхнеуральского, Александринского и Ашебутакского рудных районов, по сравнению с Карамалыташско-Сибайской площадью соотношения РЗЭ меняются. В Верхнеуральско-Александринской группе возрастает количества ЛРЗЭ при сохранении уровня концентраций ТРЗЭ. Концентрации La в пределах Сибайско-Карамалыташской площади варьирует 0.8–4.38 г/т, в Александринском рудном районе 3.2–10.5 г/т; там же Yb 0.8–3.66 и 1.39–3.46 г/т; La/Yb 0.56–1.85 и 1.04–5.9. Таким образом, выделяются две ассоциации кислых пород: Сибайско-Карамалыташско-Учалинская обедненная ЛРЗЭ и Верхнеуральско-Александринско-Ашебутакская, обогащенная ЛРЗЭ. Аналогичный тренд отличий обнаруживается и по соотношениям U и Th в вулканитах Сибайского и Александринского рудных районов [11]. Предполагается, что эти отличия связаны с более тыловодужной надсубдукционной позиций Александринского и Ашебутакского рудных районов по сравнению с Сибайским рудным районом [17]. Подобный тренд обнаруживает также характер распределения других литофильных элементов и сериальных типов вулканитов, а так же состав руд в рассматриваемых колчеданных месторождениях, более полиметаллический в Верхнеуральском, Александринском и Ашебутакском рудных районах, по сравнению с Сибайским и Учалинским рудными полями.

Формирование контрастных и непрерывных колчеданоносных комплексов происходило в надсубдукционной зоне среднепалеозойской островной дуги. Появление заметных объемов кислых пород связано с тем, что поднимающийся мантийный диапир, содержащий субдукционную флюидную фазу достигал нижней базальтовой амфиболизированной коры [29, 30]. Под воздействием высоких температур, в присутствии флюидов в нижней коре происходило выплавление кислых магм. Их высокая рудогенерирующая роль определена по составу расплавных и флюидных включений в кварце кислых пород [4]. Магматический флюид содержит повышенные концентрации (г/т): Cu 300–3700, Zn 800–3400, Pb 14–1000, Ba 20–7200, Au 4–8, Ag 4–11. В.В. Холодновым установлено также, что апатиты интрузивных гранитоидов крупных колчеданоносных месторождений содержат повышенные концентрации Cl. По данным Б.А. Дороговина, Р.И. Костиной, А.С. Бобохова установлены высокие температуры гомогенезации ( $T_{гом}$  1085–1190 °C для кислых пород контрастных формаций; 980–1090 °C для кислых пород непрерывной формаций).

### Выводы

1. По геохимическим материалам выделены 4 группы кислых вулканитов: 1 — островодужных вулканитов и интрузивных пород, преимущественно известково-щелочной серии, слагающих комплексы Тубинско-Гайского пояса; 2 — субокеанических кислых пород переходных от толейтовой к известково-щелочной серии в составе карамалыташского комплекса и его возрастных аналогов; 3 — субщелочных натриевых пород в составе ивановско-бурибайской группы, которые обнаруживают (рис. 2) положительную корреляцию  $Al_2O_3$  и Yb и признаки ликвационного происхождения; 4 — субщелочных калиево-натриевых кислых пород сукраковско-джусинской группы, которые также обнаруживают положительную корреляционную зависимость между  $Al_2O_3$  и Yb, однако этот тренд фиксируется на более высоком уровне концентраций Yb.

2. Появление дифференцированных вулканических комплексов с родственной геохимией вулканитов от основных до кислых составов пород, скорее всего, связано с автономным характером

эволюции магматизма, в конкретных поднимающихся мантийных диапирах, занимающих различную геодинамическую позицию.

3. Имеющиеся геологические, геохимические и петрографические материалы позволяют предполагать, что при формировании кислых пород колчеданоносных комплексов происходят процессы частичного плавления базитов нижней коры, магматической и кристаллизационной дифференциации, гибридизма с вариантами загрязнения кислых расплавов пироксенсодержащими базитами и смешения базальтовых расплавов с частично раскристаллизованными кислыми магмами.

4. Наиболее продуктивны на колчеданное оруденение геодинамические зоны, располагавшиеся над зоной субдукции. Высокая продуктивность этих зон на колчеданное оруденение коррелируется с присутствием толеитовых и бонинитовых основных пород, возникших при высоких степенях плавления мантийного субстрата при участии мантийных флюидов и с большими объемами кислых вулканитов, значительная часть которых является продуктом палингенеза.

*Работа выполнена в соответствии с госзаказом № 0252-2017-0011 и программы президиума РАН № 19.*

#### Литература:

1. Аристов В.А., Борисенко Д.В., Руженцев С.В. Конодонтовая стратиграфия девонских отложений западного склона Южного Урала // Очерки по региональной тектонике. – М.: Наука, 2005. – С. 36–55. – (Тр. ГИН РАН; Вып. 561, Т 1).
2. Арт Дж.Г. Некоторые элементы-примеси в трондjemитах – их значение для выяснения генезиса магмы и палеотектонических условий // Трондjemиты, дациты и связанные с ними породы / Под ред. Ф. Баркера. – М.: Мир, 1983. – С. 99–105.
3. Бобохов А.С., Горожанин В.М., Кузьмин С.А. Стронциево-изотопные данные для кислых вулканитов Магнитогорского мегасинклинария Южного Урала: Препринт. – Уфа, 1989. – 24 с.
4. Викентьев И.В., Борисова А.Ю., Карпухина В.С., Наумов В. Б., Рябчиков И.Д. Прямые данные о рудоносности кислых магм Узельгинского рудного поля (Южный Урал, Россия) // Докл. РАН. – 2012. – Т. 443, № 3. – С. 347–351.
5. Вольнец О.Н., Антипин В.С., Перепелов А.Б., Аношин Г.Н. Геохимия вулканических серий островодужной системы в приложении к геодинамике (Камчатка) // Геология и геофизика. – 1990. – № 5. – С. 3–13.
6. Вулканизм Южного Урала / И.Б. Серавкин, А.М. Косарев, Д.Н. Салихов, С.Е. Знаменский, З.И. Родичева, М.В. Рыкус, В.И. Сначев. – М.: Наука, 1992. – 197 с.
7. Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. – 315 с.
8. Кабанова Л.Я., Зайков В.В. Пикриты и марианит-бониниты палеоостроводужной системы Южного Урала // Типы магматизма Урала. – Свердловск: УрО АН СССР, 1987. – С. 108–110.
9. Колчеданные месторождения Баймакского рудного района / П.Ф. Сопко, М.И. Исмагилов, И.Б. Серавкин, Л.Н. Сопко. – М.: Наука, 1973. – 224 с.
10. Косарев А.М. Силуро-девонский вулканизм Бурибай-Маканского рудного района (Южный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М., 1977. – 30 с.
11. Косарев А.М., Голованова И.В., Шафигуллина Г.Т. Особенности распределения оксида калия, урана и тория в вулканитах Южного Урала в связи с проблемой генезиса минимума теплового потока // Литосфера. – 2009. – № 6. – С. 17–32.
12. Косарев А.М., Измайлова А.А. Особенности химизма кремнекислых пород южно-ирендыкского палеовулканического комплекса. // Геологический сборник № 10 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПресс, 2013. – С. 160–168.
13. Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эйфельских островодужных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. – 2005. – № 4. – С. 22–41.
14. Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности среднедевонско-раннекаменноугольных островодужных и коллизионных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. – 2006. – № 1. – С. 3–21.
15. Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Колчеданность Южного Урала: корреляция запасов Cu и Zn с геохимическими характеристиками базальтов рудных районов // Докл. РАН. – 2010. – Т. 434, № 6. – С. 1–5.



16. *Косарев А.М., Светов С.А., Чаженина С.Ю., Шафигуллина Г.Т.* Бонинитовые вариолиты бурибайского вулканического комплекса Южного Урала: минералогия, геохимия и условия образования // Литосфера. — 2018. — № 2. — С. 246–279.
17. *Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В.* Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданоносной мегазоны на Южном Урале // Литосфера. — 2014. — № 2. — С. 3–25.
18. *Косарев А.М., Серавкин И.Б., Шафигуллина Г.Т.* Субшелочной и известково-щелочной вулканизм ранне-эйфельского возраста и связанное с ним колчеданное полиметаллическое оруденение в Магнитогорской мегазоне Южного Урала // Литосфера. — 2017. — Т. 17, № 3. — С. 29–58.
19. Магматические горные породы. Кислые и средние породы / *Под ред. В.В. Ярмолюка, В.И. Коваленко.* — М.: Наука, 1987. — Т. 4. — 374 с.
20. *Маллас Дж.* Две контрастирующие трондjemитовые ассоциации из перемещенных офиолитов в западном Ньюфаундленде: первое сообщение // Трондjemиты, дациты и связанные с ними породы / *Под ред. Ф. Баркера.* — М.: Мир, 1983. — С. 339–353.
21. *Маслов В.А., Артюшкова О.В.* Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 288 с.
22. Медноколчеданные месторождения Урала. Условия формирования / *Отв. редакторы С.Н. Иванов, В.А. Прокин.* — Екатеринбург: УрО РАН, 1992. — 307 с.
23. *Никешин Ю.В.* Палеовулканические структуры и условия локализации колчеданного оруденения Гайского рудного поля (Южный Урал): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / ЦНИГРИ. — М., 1986. — 24 с.
24. Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей / *Под ред. О.А. Богатикова, Г.П. Авдейко, Ю.И. Дмитриева, А.А. Цветкова.* — М.: Наука, 1987. — 335 с.
25. *Прокин В.А.* Закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале. — М.: Недра, 1977. — 176 с.
26. *Прокин В.А., Нестеренко В.С., Буслаев Ф.П.* Геология Гайского месторождения // Гайский ГОК; Геология Гайского и Подольского медно-цинковых колчеданных месторождений на Урале. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. — 148 с.
27. *Серавкин И.Б., Косарев А.М.* Палеовулканическая история формирования Подольского рудного поля и месторождения (Южный Урал) // Геология рудных месторождений. — 1983. — Т. 25, № 5. — С. 72–86.
28. *Сурин Т.Н.* Петрология и геохимия вулканитов раннеживетской базальт-риолитовой колчеданоносной формации (Южный Урал): Препринт / УфНЦ РАН. — Уфа, 1993. — 45 с.
29. Трондjemиты, дациты и связанные с ними породы / *Под ред. Ф. Баркера.* — М.: Мир, 1983. — 488 с.
30. *Ферштатер Г.Б.* Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. — Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. — 368 с.
31. *Herrington R.J., Armstrong R.N., Zaykov V.V., Tessalina S.G., Orgeval J.J., Taylor R.N.A.* Massive Sulfide Deposits in the South Urals: Geological Setting Within the Framework of the Uralide Orogen // Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present Geophysical Monograph 132. / *Eds. D. Brown et al.* — American geophysical Union, Washington, DC, 2002. — P. 155–182.
32. *Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G.* Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *Petrology.* — 1984. — V. 25. — P. 956–983.
33. *Spadea P., Kabanova L., Scarrow J.H.* Petrology, geochemistry and geodynamic significance of Mid-Devonian boninitic rocks from the Baimak-Buribai area (Magnitogorsk zone, Southern Urals) // *Ofioliti.* — 1998. — V. 23, No 1. — P. 17–36.
34. *Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Y., Brown D.* Arc-continent collision in the Southern Urals: Petrogenetic aspects of the Forearc – arc Complex. Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present. // *Geophysical Monograph.* — 2002. — V. 132. — P. 101–134.