

Геохимическая зональность даек позднеживетского габбро-диабазового комплекса на Джусинском колчеданно-полиметаллическом месторождении, Южный Урал

Е.И.ЯРЦЕВ (Московский государственный университет (МГУ) им. М.В.Ломоносова; 119991, г. Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, д. 1; ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук (ИГЕМ РАН); 119017, г. Москва, Ж-17, Старомонетный пер., д. 35),
Н.Н.ШАТАГИН (Московский государственный университет (МГУ) им. М.В.Ломоносова; 119991, г. Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, д. 1)

Кластерный анализ содержаний малых элементов в дайках габбро-диабазового комплекса позволил выявить различие в концентрации редкоземельных и высокозарядных элементов и выделить разные по составу группы даек. Нормирование к хондритовому стандарту показало неоднородные тренды распределения лантаноидов. Использование множественной регрессии выявило неодинаковую вертикальную геохимическую зональность для каждой группы. *Ключевые слова:* Джусинское месторождение, кластерный анализ, множественная регрессия, колчеданные руды.

Ярцев Евгений Игоревич
Шатагин Николай Николаевич



yar@geol.msu.ru
shatagin@geol.msu.ru

Geochemical zoning of dykes from Late Givetian gabbro-dabase complex at Dzhusa pyrite polymetallic deposit, South Urals

E.I.YARTSEV, N.N.SHATAGIN

Cluster analysis of minor elements contents in dykes of porphyry gabbro allowed to reveal differences in concentration of REE and high-charge elements and distinguish groups of dykes different in composition. Chondrite normalizing values for lanthanides demonstrate nonuniform trends. Application of multiple regression enabled to establish varying vertical geochemical zoning in dykes of various groups.

Key words: Dzhusa ore deposit, cluster analysis, multiple regression, massive sulfide ore.

Широкое распространение субвулканических тел и разновозрастных даек на Джусинском колчеданно-полиметаллическом месторождении, а также сложность взаимоотношений этих образований с оруденением вызывает не только научный, но и практический интерес. Последний вызван тесной пространственной связью оруденения с участками максимальной концентрации даек габбро-диабазового субвулканического комплекса [4, 6, 8]. С одной стороны, выдвинутое предшествующими исследователями [2, 8] положение о том, что дайки явились своеобразными экранами для рудоотложения, дает возможность оценить их роль в распределении максимальных концентраций рудных компонентов и значение в формировании рудных столбов. С другой – авторами при многолетних полевых исследованиях наблюдались контактовые взаимоотношения даек как с явно наложенным на них оруденением и согласного залегания с линзовидными рудными телами

месторождения, так и отчетливые секущие, говорящее о явном пострудном внедрении даек. С последними, вероятно, может быть связан контактовый метаморфизм руд и перераспределение рудного вещества.

Цель работы – краткая петрографическая характеристика даек габбро-диабазового комплекса с последующим выделением различных по составу подгрупп этих образований на основании распределений содержаний редкоземельных элементов, а также выявление специфических геохимических особенностей для каждой группы даек с использованием статистических методов.

Характеристика Джусинского месторождения. Джусинское колчеданно-полиметаллическое месторождение размещено в пределах Теренсайско-Карабу-такской антиклинальной зоны. Теренсайский рудный район, к которому приурочено месторождение, расположен на восточном склоне Южного Урала. В административном отношении он принадлежит к Адамов-

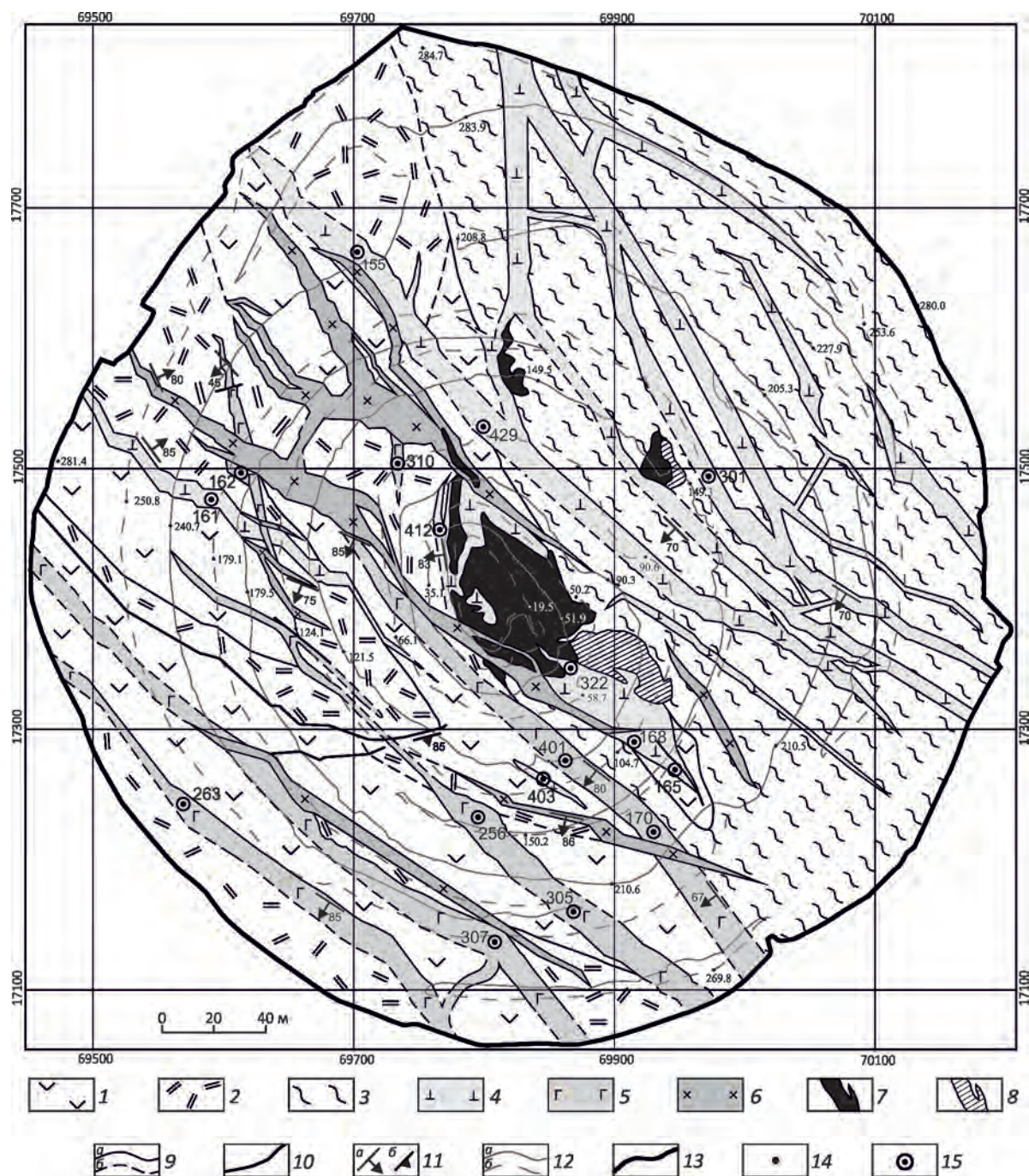


Рис. 1. Схематическая геологическая карта карьера Джусинского месторождения. Составитель Е.И.Ярцев, 2015:

1 – андезиты; 2 – дациты; 3 – кварц-серицитовые метасоматиты; 4–5 – дайки раннеэфельско-раннеживетского габбро-диабазового субвулканического комплекса: 4 – дорудные D₂ef₁, 5 – порудные D₂gv₁; 6 – дайки раннекаменноугольного магнитогорского диоритового интрузивного комплекса; 7 – колчеданно-полиметаллические руды; 8 – серноколчеданные руды; 9 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые; 10 – разрывные нарушения; 11 – элементы залегания: а – контактов даек и рудных тел, б – разрывных нарушений; 12 – границы уступов карьера: а – бровки уступов, б – подножья откосов; 13 – контуры карьера; 14 – абсолютные высотные отметки; 15 – точки отбора проб; на карте показаны лишь точки отprobования 2015 г., остальные пробы, участвовавшие в исследовании, были отобраны в прежние годы

скому району Оренбургской области. В геологическом отношении приурочен к участку сопряжения Восточно-Магнитогорской зоны с Восточно-Уральским мегаантиклинорием [6–8]. Джусинское месторождение представляет собой серию изолированных друг от друга линзовидных рудных залежей северо-западного простирания или столбообразных крутопадающих тел (рис. 1). Главная масса залежей сконцентрирована на небольшом участке в вулканогенной толще андезит-дацитового состава, принадлежащей к карамалыташской свите эмс-эйфельского возраста [1]. На участке месторождения широко развиты разнообразные по составу дайки раннеэйфельско-раннеживетского габбро-диабазового субвулканического комплекса и раннекаменноугольного Магнитогорского габбро-диоритового интрузивного комплекса [2, 12]. Дайки габбро-диабазового субвулканического комплекса по ряду признаков являются дорудными, а дайки нижнекаменноугольного магнитогорского комплекса – пострудными [4, 8].

Постановка задачи и методы исследований. При полевых исследованиях даек раннеэйфельско-раннеживетского габбро-диабазового комплекса по результатам картирования карьера Джусинского месторождения и подробной документации бортов возникло предположение о неоднородности данного комплекса: одни дайки предположительно являются субвулканическими образованиями, сформированными на этапе активного вулканизма, другие – более поздними секущими телами. Для подтверждения данной гипотезы были использованы статистические методы классификации содержаний малых, редких и редкоземельных элементов. Всего в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН было проанализировано 25 штучных проб. Количественный анализ проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, аналитик Д.Б.Петренко, 2016). Этим методом были определены содержания в ppm следующих элементов: Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U.

Для предварительного разделения даек на группы, был использован кластерный анализ (метод *k*-средних) преимущественно по редкоземельным и высокозарядным элементам. Построение REE диаграммы, нормированной к хондритовому стандарту, позволило выделить как минимум 2 группы даек по трендам распределения лантаноидов.

С целью выявления вертикальной геохимической зональности даек авторы использовали аппарат множественной регрессии [10]. Для описания вертикальной зональности наиболее важны такие параметры регрессионной модели, как коэффициенты множественной корреляции, коэффициент регрессии, частные коэффициенты корреляции и соответствующие им уровни значимости [10].

Кластеризация проб. При общей кластеризации содержаний с помощью модуля программы STATISTICA 10 на 2 кластера методом *k*-средних произошло явное разделение наблюдений по ряду элементов. Для выделенных кластеров 1 и 2, средние значения параметров содержаний редкоземельных (La-Ce-Pr-Nd-Sm-Eu-Gd-Tb-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu), а также некоторых высокозарядных элементов (Hf-Ta-Y-Zr-Nb-Ti) существенно отличаются друг для друга. Обе группы характеризуются высокой устойчивостью при различных геологических процессах [5], а значит, характеризуют первичный состав даек. Для более наглядной визуализации анализа методом подбора, из процедуры кластеризации были исключены элементы, вносящие несущественный вклад в разделение даек. Таким образом, первичный график был преобразован в график, демонстрирующий наиболее оптимальный вариант кластеризации (рис. 2).

Был произведен анализ наблюдений выделенных групп. В 1 кластер, состоящий из 10 наблюдений, попали пробы из тел, развитых в основном в надрудной толще вмещающих андезито-дацитов. Данная группа характеризуется меньшей степенью вторичных изменений и, в ряде случаев, секущим положением относительно рудных тел. Во вторую группу, состоящую из 15 наблюдений, попали пробы из подрудной толщи, с наложенным оруденением, а также из близконтактных зон с рудой и даек центральной рудоносной зоны. Эти пробы характеризуются высокой степенью вторичных изменений.

При разбиении на большее количество кластеров, например на 3, получим следующее распределение (рис. 3). Из рисунка видна нецелесообразность выделения 3 кластеров, поскольку два из них (2 и 3) имеют незначительно различающиеся средние значения содержаний. Увеличение количества кластеров нецелесообразно, так как такое детальное разбиение проб затрудняет их интерпретацию, поэтому ограничимся двумя.

По результатам кластерного анализа было произведено нормирование содержаний редкоземельных элементов к хондритовому стандарту (рис. 4) [11]. Как видно из графика, группу проб 1 кластера можно разделить на 2 подгруппы: первая подгруппа имеет ярко выраженный отрицательный наклон распределения, что говорит об обеднении тяжелыми лантаноидами относительно легких, вторая подгруппа имеет менее выраженный отрицательный наклон. Последняя группа (кластер 2) субпараллельно распределена относительно оси X.

Тот факт, что на диаграмме происходит плавное изменение трендов, скорее всего, говорит о том, что дайки различных подгрупп формировались с небольшим временным отрывом друг от друга.

Характеристика выделенных подгрупп габбро-диабазового комплекса. Первая группа, включающая пробы 162, 170, 263, 307 и др., – дайки, расположенные в юго-западной части карьера, в надрудной толще

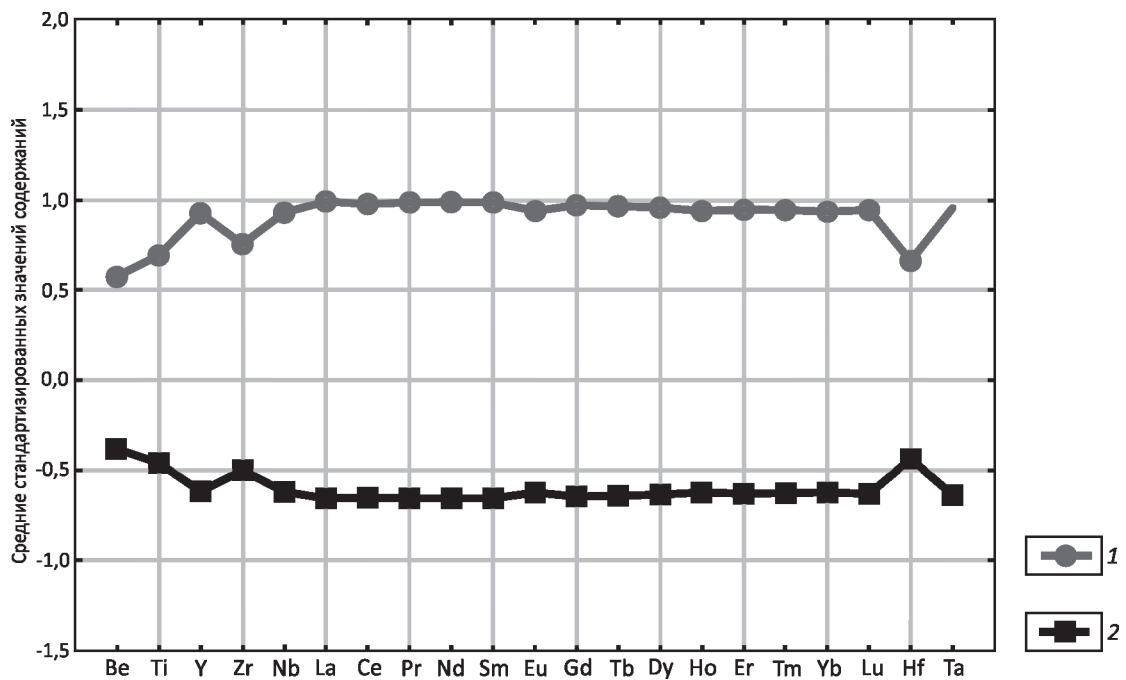


Рис. 2. Линейный график средних значений содержаний редкоземельных и высокозарядных элементов для двух кластеров: кластер: 1 – первый и 2 – второй

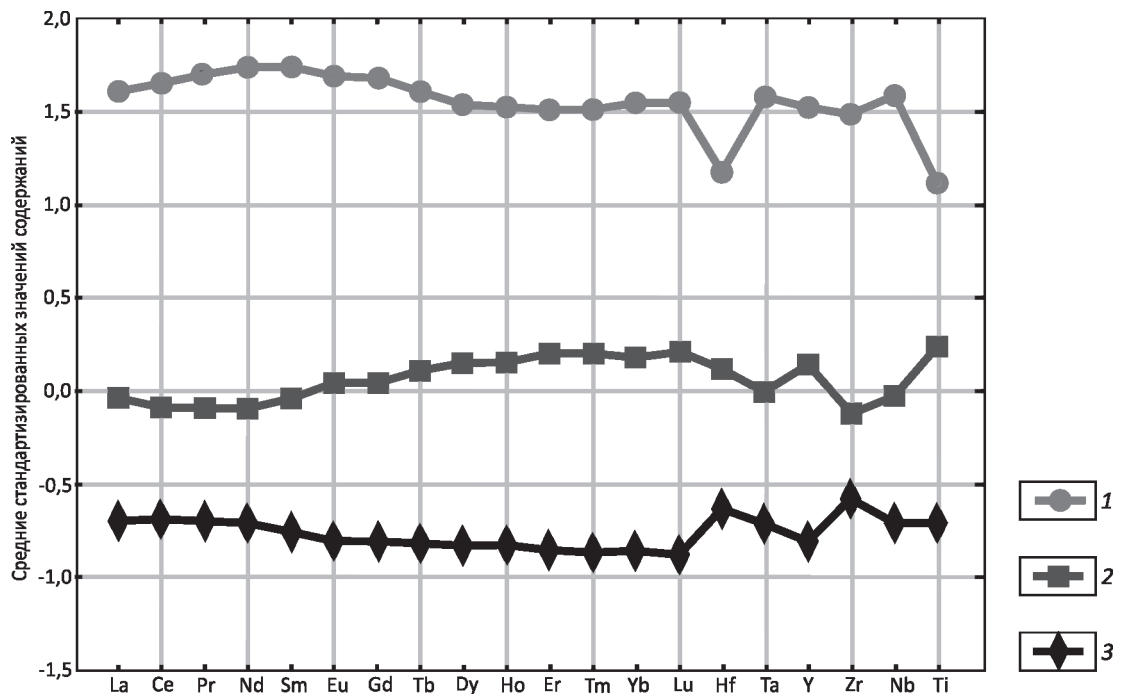


Рис. 3. График средних значений содержаний редкоземельных и высокозарядных элементов при кластеризации наблюдений на три группы:

кластер: 1 – первый, 2 – второй и 3 – третий

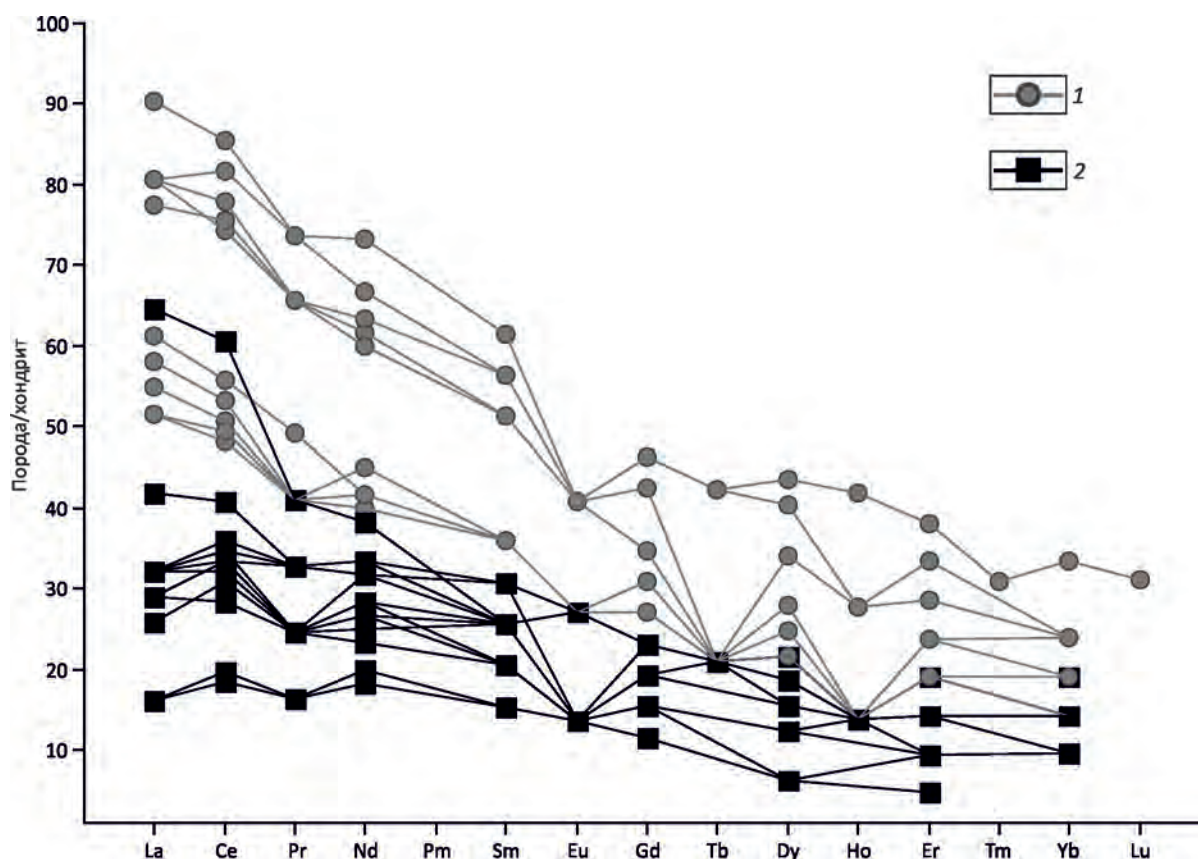


Рис. 4. Распределение REE в дайках позднеживетского габбро-диабазового субвулканического комплекса. Нормализовано к хондриту по W.V.Boynnton, 1984 [11]:

кластер: 1 – первый и 2 – второй

эффузивов андезитового и дацитового составов, контактов с рудой нет (см. рис. 1). Пробы отобраны преимущественно в центральных частях даек, в интервале горизонтов 175–265 м, то есть в верхах карьера. Эти породы слабо подвержены вторичным изменениям. Макроскопически в некоторых образцах наблюдаются редкие вкрапленники плагиоклаза – структура редкопорфировая. Петрографически это афировые, гипидиоморфнозернистые или пангипидиоморфнозернистые, офитовые или габбро-офитовые структуры. Коэффициент удлинения плагиоклаза составляет 1–3, размер зерен 0,5–1 мм. Данная группа характеризуется слабой и средней степенью вторичных изменений. Текстура массивная. Состав плагиоклаза отвечает альбиту или олигоклазу.

Для второй группы (пробы 256, 305, 310, 401 и др.) какую-либо закономерность в масштабе карьера выявить не удастся – часть проб отобраны из даек вблизи рудной зоны, часть – на удалении. Группа характеризуется массивной текстурой, структура пород порфировая или редкопорфировая, в основной массе пан- или

гипидиоморфнозернистая, офитовая, пойкилоофитовая, габбро-офитовая. В порфировых разностях вкрапленники плагиоклаза имеют удлинение 1→5 при размере 0,5–1мм, состав отвечает олигоклазу, основная масса зерен – удлинение 1–2 и размер 0,3 мм. Афировые разновидности имеют удлинение зерен плагиоклаза 1–3 и размер до 1 мм, состав отвечает андезину. Степень проявления вторичных изменений – от слабой до ярко выраженной.

Третья группа проб (155, 161, 165, 168, 301, 322, 403, 412, 429 и др.) тяготеет к узкой полосе рудоносной зоны северо-западного простирания и пространственно связана с оруденением. Также сюда попадают пробы тел, развитых в кварц-серицитовых метасоматитах северо-восточной части карьера. Большинство этих тел сосредоточено в лежащем боку рудоносной зоны. Метасоматиты сформированы в процессе предрудного метасоматоза и наложены как на ранние дайки, так и на вмещающие породы месторождения. Данная группа содержит пробы массивной, пористой и миндалекаменной текстуры. Семейства структур: в основном

пан-, гипидиоморфнозернистые, редкопорфировые, афировые. Разновидности структур – габбро-офитовые, офитовые, пойкилоофитовые. Удлинение плагиоклазов основной массы варьирует в пределах 1–6, зерна крупные, в основном размером до 2 мм. Пригодные для определения состава зерна плагиоклаза диагностируются как андезин. В данной группе степень вторичных изменений проявлена наиболее сильно.

Практически во всех группах пород первичные минералы замещены вторичными – актинолитом, хлорит-эпидотовым мелкочешуйчатым агрегатом (предположительно на месте пироксенов), активно развита серицитизация, сосюритизация, хлоритизация. Между лейстами плагиоклаза встречаются также рудные минералы – лейкоксен, магнетит и пирит, а в некоторых случаях (редко) развиты кварц, карбонаты.

Рассмотрение данных групп показывает нецелесообразность разделения даек на 3 подгруппы, так как это затрудняет геологическую интерпретацию. Данное разделение неоправданно еще и потому, что две подгруппы, слагающие первый кластер, близки петрографически. Поэтому далее авторы будут выделять только две группы даек, полученные кластерным анализом (см. рис. 2) и выявляющиеся на REE-диаграмме (см. рис. 4). Таким образом, первые 2 подгруппы авторы объединили в одну группу, несущественные различия трендов лантаноидов в которой свидетельствуют лишь о некой растянутости во времени формирования даек данной группы. Разделение на две группы хорошо сочетается с геологическими данными, учитывая обнаруженный факт пересечения дайкой, принадлежащей к первому кластеру (пострудному), дайки, входящей во второй кластер (дорудный), в западной части карьера

(см. рис. 1). Таким образом, первому кластеру соответствуют слабоизмененные дайки, развитые преимущественно в надрудной толще, второму – измененные, развитые в зоне оруденения, в подрудной, реже надрудной толщах вмещающих пород.

Множественная регрессия. В регрессионном анализе рассматривается односторонняя связь случайной зависимой переменной от одной или нескольких независимых переменных. Независимые переменные называются предикторами, зависимые – откликами [10]. В качестве отклика в нашем случае выступает абсолютная высота пробоотбора, в качестве предикторов – концентрации химических элементов в ppm. Расчеты проводились для каждой из двух групп наблюдений в отдельности, выделенных по результатам кластерного анализа и анализа распределения редкоземельных элементов, нормированного к хондриту.

В результате первого просчета в модуле Multiple Regression программы STATISTICA 10 [5] был получен набор статистической информации (табл. 1).

Из приведенных результатов анализа следует, что зависимость между откликом и предикторами в обоих кластерах сильная ($R^2 > 0,75$), то есть построенные линейные регрессии адекватно описывают взаимосвязь между откликом и предикторами. Кроме того, значение R^2 , близкое к 1 (как в первом, так и втором кластерах), показывает, что модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных [9].

Следующим шагом в программе было определение значимых коэффициентов регрессии и определение частных коэффициентов корреляций (таблицы 2 и 3). После просчета в программе STATISTICA 10 программа выдает значимые и не значимые коэффициенты

1. Результаты множественной регрессии для двух кластеров наблюдений

Кластер	R	R ²	Adjusted R ²	F	p	σ
1	0,999999951	0,999999990	0,999999913	129342	0,00068	0,052242
2	0,999999990	0,999999998	0,999999973	401944	0,00039	0,023141

Примечание. Коэффициент: R – множественной корреляции, R² – детерминации, Adjusted R² – скорректированный детерминации; F – значение F-критерия; p – уровни значимости, σ – стандартная ошибка оценки.

2. Значимые коэффициенты для первого кластера

Коэффициенты	Tl	Ga	Sr	Eu	Sc	Zn	Ta	Sm
β	-0,42	0,79	0,55	-0,61	-0,33	0,11	0,13	-0,07
r	-0,99	1,00	0,99	-0,99	-0,99	0,99	0,99	-0,99

Примечание. Здесь и в табл. 3: β – значимые коэффициенты регрессии, r – коэффициенты частной корреляции.

3. Значимые коэффициенты для второго кластера

Коэффициенты	Nd	Co	Th	As	Se	Nb	Tm	Sm	Mn	Sr	V	U	Cd
β	2,40	-0,01	3,57	-3,93	2,02	-1,66	2,05	-3,14	0,47	0,18	0,39	-0,03	0,003
r	0,99	-0,99	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,99	0,99	0,99	-0,99	0,99

4. Предсказанные и наблюдаемые значения зависимой переменной (высоты горизонта) для 1 кластера

Номера проб	Наблюдения	Предсказанные значения
Dj-162	180,00	179,96
Dj-170	150,00	150,02
Dj-221	110,00	109,98
Dj-263	252,00	252,00
Dj-307	220,00	219,99
Dj-148	160,00	159,99
Dj-310	60,00	60,01
Dj-305	210,00	210,02
Dj-256	150,00	149,99
Dj-324	197,00	197,00

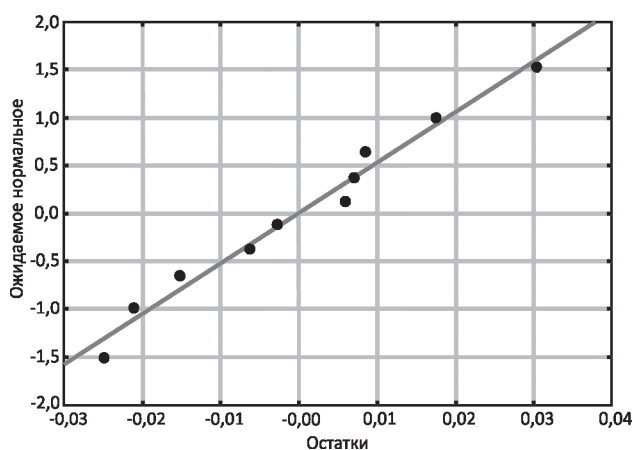


Рис. 5. Нормальный вероятностный график остатков для первого кластера наблюдений

регрессий. Значимыми оказались коэффициенты регрессий для содержаний: первого кластера – **Sm**, Eu, Ta, Tl, Ga, Sc, **Sr**, Zn; второго – Nd, **Sm**, Tm, As, **Sr**, Cd, Co, Se, V, Th, Nb, Mn, U. Содержания этих элементов изменяются с глубиной линейно, остальные компоненты подчиняются другим законам распределения и из расчётов удаляются [10]. Среди значимых есть как элементы с положительными, так и отрицательными коэффициентами. Положительные значения коэффициентов свидетельствуют об увеличении содержаний химических элементов вместе с увеличением высоты пробоотбора. Отрицательные значения соответствуют увеличению их содержания с глубиной. Заметим, что в двух группах даек существуют повторяющиеся элементы – Sr, Sm. Они характерны для обоих кластеров и имеют одинаковую закономерность концентрации в обоих комплексах (Sr концентрируется в верхних гори-

зонтах, в то время как Sm – в нижних). Коэффициенты частной корреляции позволяют ранжировать предикторы по тесноте их связи с вертикальной координатой (см. таблицы 2 и 3) [10].

Уравнения регрессии можно использовать для прогноза значений отклика (высоты горизонта) по значению предикторов – концентрации элементов. В табл. 4 в качестве примера показаны наблюдаемые и предсказанные программой значения зависимой переменной для 1 кластера.

Важной характеристикой регрессионного анализа являются остатки. Для визуального анализа можно использовать нормальные вероятностные графики остатков (рис. 5), из которого видно, что точки расположены близко к прямой, следовательно, регрессионная модель адекватна результатам наблюдений [3].

Проанализировав полученные выше данные, можно сделать следующие выводы. Кластеризация проб по содержаниям малых и редких элементов позволила отчетливо выявить две различающиеся по составу подгруппы тел в составе раннеэфельско-раннеживетского габбро-диабазового субвулканического комплекса. Различие проявлено в распределении редкоземельных и высокозарядных элементов. Нормирование содержаний лантаноидов к хондритовому стандарту подтвердило целесообразность такого разделения. Кроме того, в составе выделенного 1 кластера по REE-диаграмме выявляются свои 2 подгруппы. Геологическая и петрографическая интерпретация получившихся 3 групп наблюдений показала целесообразность выделения 2 групп даек. Проведенная по этим двум группам множественная регрессия с целью выявления особенностей вертикальной геохимической зональности показала следующие результаты. Образования габбро-диабазового субвулканического комплекса имеют разную вертикальную геохимическую зональность по ряду элементов. Для первого кластера с высотой будут возрастать содержания Ta, Ga, Sr, Zn, а с глубиной будут увеличиваться содержания Eu, Tl, Sc, Sm. Для второго – с высотой пробоотбора происходит линейное увеличение содержаний Nd, Tm, Sr, Cd, Se, V, Th, Mn, в то время как повышенные концентрации As, Co, Sm, Nb, U будут обнаруживаться на нижних горизонтах. Данный факт подтверждает адекватность выделения в составе комплекса подгрупп даек, так как эти образования имеют разную вертикальную геохимическую зональность.

Из результатов исследований следует заключить, что статистический аппарат множественной регрессии можно использовать в качестве метода, позволяющего выявить и охарактеризовать зональность магматических пород, и как один из вспомогательных методов их типизации, что необходимо учитывать при проведении разведочных работ.

Работа выполнена при поддержке программы прецедента РАН I.4П («Урал»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшкова О.В.* Конодонтовые комплексы эмса–среднего девона Магнитогорского мегасинклинория и их стратиграфическая приуроченность // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2000. Т. 75. Вып. 2. С. 16–23.
2. *Воробьев В.И.* Геологические закономерности размещения медноколчеданных и медно-полиметаллических месторождений в Теренсайском рудном районе (Южный Урал) // Дис. ... канд. геол.-минер. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1968.
3. *Вуколов Э.А.* Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. – М.: Форум, 2008.
4. *Ерёмин Н.И., Коган Б.С.* Взаимоотношения даек и оруденения на Джусинском колчеданно-полиметаллическом месторождении (Южный Урал) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1964. Т. 39. № 6. С. 137–138.
5. *Интерпретация геохимических данных* // Под ред. Е.В.Склярова. – М: Интермет Инжиниринг, 2001.
6. *Косарев А.М., Артюшкова О.В.* Джусинский палеовулканический комплекс: стратиграфическое положение, геохимические особенности, геодинамические реконструкции // Геологический сборник ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2007. № 6 С. 174–180.
7. *Рыкус М.В.* Вулканизм и металлогения Джусинско-Домбаровского палеовулканического пояса Южного Урала // БНЦ УрО РАН. – Уфа, 1992.
8. *Теренсайский рудный район* / Н.И.Ерёмин, В.И.Воробьев, Г.С.Петрова, Г.Ф.Яковлев // Палеозойский вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. – М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 177–208.
9. *Халафян А.А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 2-е изд., переработ. и дополн. Учебник. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2010.
10. *Шатагин Н.Н., Сергеев А.Л.* Использование множественной регрессии для изучения вертикальной геохимической зональности рудных месторождений (на примере медно-порфирового месторождения Песчанка, Чукотка) // Научная конференция: Ломоносовские чтения. – М.: МГУ, 2012.
11. *Boynnton W.V.* Cosmochemistry of the rare earth elements meteorite studies. In: Henderson P. (Ed.) // Rare Earth Element Geochemistry. – Amsterdam: Elsevier, 1984. Pp. 63–114.
12. *Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals.* Ore geology / I.V.Vikentyev, E.V.Beloglob, K.A.Novoselov, V.P.Moloshag // Ore Geology Reviews. 2016. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.032.