

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

С.Г. Паняк<sup>1</sup>, Т.С. Бобина<sup>1</sup>, В.Б. Болтыров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,  
e-mail: tanyashka1993@mail.ru

**Аннотация:** Уже более ста лет ведутся дискуссии по поводу возможности извлечения генетической информации из эмпирических кривых распределения различных компонентов в горных породах. Также актуальность поставленного вопроса определяется требованием разработки новых методик для увеличения объема геолого-генетической информации, извлекаемой из нарастающего потока аналитических данных. С физико-математическим обоснованием законов распределения тесно увязывается успешное решение ряда актуальных проблем геологии, прежде всего возможность восстановления геохимической направленности петрогенных и рудогенных процессов, оценки потенциальной рудоносности кристаллических пород. Исходя из этого, в статье рассматривается методика оценки потенциальной рудоносности магматических и метаморфических пород, которая основывается на результате математического моделирования геохимической динамики петрогенных процессов. Ранее авторами было доказано, что при получении регулярных кривых распределений тех или иных химических элементов модальным значением можно придавать определенный термодинамический смысл. Эмпирические же распределения можно рассматривать как характеристику вероятностного состояния систем, а модальные значения в них — как наиболее вероятное (оптимальное состояние) к которому стремятся системы. Указаны некоторые особенности аналитических исследований, которые требуются для использования математического моделирования и последующей надежной интерпретации полученных результатов.

**Ключевые слова:** геохимия, магматические породы, метаморфические породы, рудоносность, математическое моделирование, кривые распределения, бимодальное распределение, эмпирическая кривая распределения.

**Для цитирования:** Паняк С. Г., Бобина Т. С., Болтыров В. Б. Геохимические критерии потенциальной рудоносности магматических и метаморфических пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. – С. 85–94. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_85.

## Geochemical criteria for the potential ore content of igneous and metamorphic rocks

S.G. Panyak<sup>1</sup>, T.S. Bobina<sup>1</sup>, V.B. Boltyrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: tanyashka1993@mail.ru

---

**Abstract:** For more than a hundred years, discussions have been held about the possibility of extracting genetic information from empirical distribution curves of various components in rocks. Also, the relevance of the question is determined by the requirement to develop new techniques to increase the volume of geological and genetic information extracted from the growing flow of analytical data. The successful solution of a number of topical problems of geology, first of all, the possibility of restoring the geochemical orientation of petrogenic and ore-bearing processes, and assessing the potential ore content of crystalline rocks, is closely linked with the physical and mathematical justification of the distribution laws. Based on this, the article discusses the methodology for assessing the potential ore content of igneous and metamorphic rocks, which is based on the results of mathematical modeling of the geochemical dynamics of petrogenic processes. Earlier, the authors proved that when obtaining regular distribution curves of certain chemical elements, a modal value can be given a certain thermodynamic meaning. Empirical distributions can be considered as a characteristic of the probabilistic state of systems, and modal values in them — as the most probable (optimal state) to which systems aspire. Some features of analytical studies that are required for the use of mathematical modeling and subsequent reliable interpretation of the results are indicated.

**Key words:** geochemistry, igneous rocks, metamorphic rocks, ore bearing, mathematical modeling, distribution curves, bimodal distribution, empirical distribution curve.

**For citation:** Panyak S. G., Bobina T. S., Boltyrov V. B. Geochemical criteria for the potential ore content of igneous and metamorphic rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-2):85-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_85.

---

## Введение

22 июня 2022 г. Министерство природных ресурсов и экологии России опубликовало доклад о реализации Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации на период до 2035 г., где была обозначена необходимость наращивать запасы углеводородов и твердых полезных ископаемых. Стало очевидным истощение в стране месторождений с легко извлекаемыми запасами, что касается, в том числе, залежей углеводородов. К настоящему времени в научных и производственных организациях накоплен большой аналитический материал, позволяющий без относительно больших затрат оценивать потенциальную рудоносность массивов магматического и метаморфического генезиса [1–4]. Это касается известных рудных регионов и, прежде всего, Урала.

Надежная оценка потенциальной рудоносности упомянутых массивов появилась после работ по математическому моделированию петрогенных и рудогенных процессов [5–7], которое позволило проследить кинетику, оценить термодинамическую активность компонентов по мере кристаллизации породы. В конечном счете получены коэффициенты распределения химических компонентов, которые позволяют оценить концентрацию компонента в породе или его вынос за ее пределы. Результаты, полученные вследствие проведенных исследований, были сконцентрированы в специальном справочном пособии «Петрохимические методы исследований горных пород» [8].

## Методы

Самая простая возможность изучить поведение химического компонента при

магматической кристаллизации представляется для эффузивных пород при наличии в них порфировых вкрапленников. Эта идея была успешно реализована в 1976 г. Л.Н. Овчинниковым [9]. Сравнивая содержание компонента во вкрапленнике (начальной стадии кристаллизации) и еще не раскристаллизованной основной массе (завершающей стадии), можно проследить динамику процесса: возможное накопление компонента, создание ореола его концентрации, или элизии — выдавливания, рассеивания.

### Результаты работ

Целенаправленное опробование массивов (см. завершение статьи) и последующее математическое моделирование различных петрохимических ситуаций, основанное на использовании центральной предельной теоремы, позволило установить не только значительное многообразие кривых распределения петрогенных и редких элементов, но и получить по ним генетическую информацию, позволяющую оценивать потенциальную рудоносность (рис. 1). Редкие симмет-

ричные распределения, подчиняющиеся нормальному закону, характерны для эвтектоидных систем с максимумом энтропии (рис. 1, а).

Часто нормальным распределением обладает главный компонент изверженных пород —  $\text{SiO}_2$ . Компоненты примеси, избыточные для магматической системы, накапливающиеся в последних порциях расплава, обладают кривыми распределений с правосторонней асимметрией, приближающимися к логнормальной модели. Эти компоненты академик Д.С. Коржинский называл пассивными [10]. Они не способны формировать устойчивые минеральные фазы, либо для них сокращается число степеней свободы (содержащие их минералы). Наиболее часто встречаемыми логнормальными распределениями обладают компоненты в процессах, которые протекают в соответствии со вторым началом термодинамики, они подвержены элизии и образуют ореолы рассеивания. Их концентрации можно ожидать в обрамлении массивов или в продуктах постмагматических процессов. Тип распределения даже основных петрогенных меняется в зави-

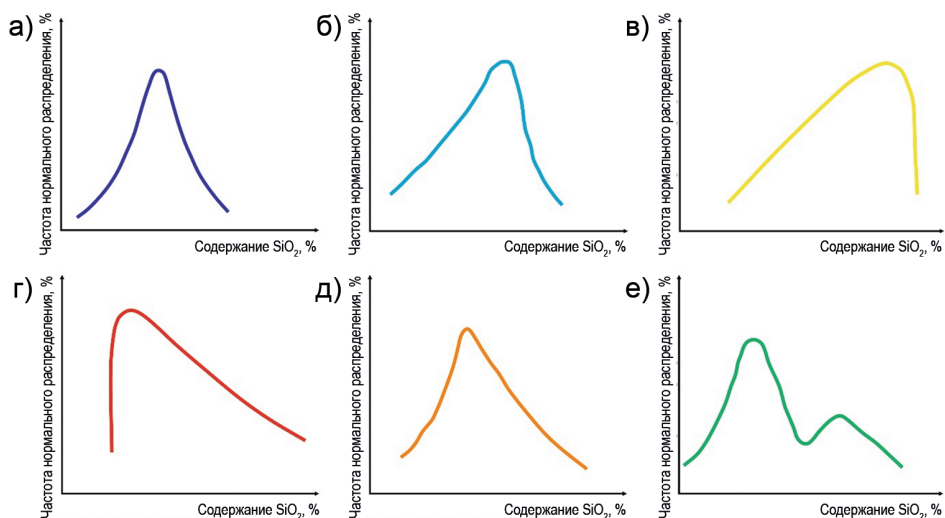


Рис. 1. Типы кривых распределений в магматических и метаморфических породах

Fig. 1. Types of distribution curves in igneous and metamorphic rocks

симости от направленности процессов. Например, в продуктах базификации логнормальными распределениями могут обладать  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в то время как в продуктах гранитизации таким распределениями обычно обладают  $\text{FeO}$  и  $\text{MgO}$ .

Более редкие распределения с левосторонней асимметрией характерны для компонентов, охотно входящих в кристаллическую структуру породы, образующие ореолы концентрации и снижающие энтропию системы (рис. 1, б, в). Здесь следует упомянуть также о том, что кристаллические породы магматического и метаморфического генезиса всегда обладают более упорядоченной структурой по сравнению с предшествующим субстратом, а сам процесс их становления происходит вопреки второму началу термодинамики. Такой тип распределения может служить надежным критерием для поисков соответствующих месторождений [11, 12].

Доказано, что логнормальные распределения редких элементов, длительное время считавшиеся феноменальным явлением природы, обусловлены лишь их небольшими содержаниями в земной коре. И в соответствии с законом действия масс они могут, при повышении концентрации в расплаве, обладать всеми известными видами распределения, характерными для главных породообразующих компонентов. Нередко они демонстрируют бимодальные распределения: на начальной стадии процесса кристаллизации испытывают рассеивание, изоморфно входя в решетку чуждых для них минералов, а по мере уменьшения объема расплава, на конечных стадиях процесса, их концентрация может превысить энергетический потенциал и тогда они формируют собственную твердую фазу в виде акцессорных минералов.

Отличаются ли законы распределения химических компонентов в магма-

тических и метаморфических породах? Между обоими процессами есть принципиальные различия. Магматические породы формируются обычно в единовременном процессе остывания и в условиях относительно закрытой системы. Метаморфогенно-метасоматические процессы, как правило, протекают в открытых системах и могут нести на себе следы наложенного предшествующего петрогенеза [13]. Именно поэтому в последних нередко отмечается бимодальность, а также модели предельного насыщения компонентом породы или предельного выноса из нее (рис. 1, в, г). Оптимальные (модальные) содержания химических компонентов в относительно закрытых магматических породах фиксируются лишь на начальных этапах кристаллизации, далее они протекают с избытком одних компонентов и дефицитом других. В относительно открытых метаморфических комплексах такие содержания достигаются на завершающих высокотемпературных стадиях. Кроме того, магматические породы формируются на фоне снижающейся температуры, а метаморфические, за редким исключением (диафориты), наоборот, в условиях ее роста.

Как показало математическое моделирование поведения химических компонентов в магматических процессах, отклонение эмпирической кривой распределения (ЭКР) от нормальной бывает тем выразительнее, чем больше отклонение содержания компонентов от эвтектоидного. Избыточные компоненты накапливаются в последних порциях расплава, а их ЭКР обычно приближаются к логнормальной модели (рис. 1, д). В редких случаях, если на завершающих стадиях их концентрация, согласно закону действия масс, достигает необходимого предела, они формируют акцессорные минералы. В этом случае на ЭКР может появиться бимодальность.

Для глубинных интрузивных пород бимодальные ЭКР отражают появление рудных минералов вследствие ликвации (рис. 1, е). Интересно отметить, что при единовременной кристаллизации породообразующих и аксессуарных минералов энтропия обеих фаз естественным образом снижается, хотя при этом математическая модель процесса показывает, что интегральная энтропия должна увеличиться. Парадокс снимается с учетом того, что энтропия величина аддитивная, то есть зависит от массы вещества. Аксессуарные минералы, снижая собственную энтропию, увеличивают плотность породы, а значит они увеличивает энтропию породы в целом.

Особого внимания заслуживают распределения в эффузивных породах с отчетливо выраженной порфирировой структурой. Здесь мы имеем дело с двумя этапами кристаллизации, а значит с двумя моделями поведения химических компонентов. Первый этап связан с выпадением минералов в глубинных очагах, а второй — на поверхности. При этом бимодальность фиксируется только для тех компонентов, которые присутствуют во вкрапленниках и основной массе. Например, наличие плагиоклазовых вкрапленников сопровождается наличием бимодальности для  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Для пироксеновых вкрапленников ана-

логичная картина отмечается для  $\text{FeO}$  и  $\text{MgO}$ .

Иногда рудные месторождения формируются в результате ликвационных процессов [14, 15]. В этом случае, как правило, распределения рудного компонента образуют бимодальные распределения, что можно проследить, например, для хромитовых руд Кемпирсайского месторождения (рис. 2).

Изложенная геохимическая картина позволяет пролить свет на металлогеническую роль упомянутых процессов. Детальные исследования редких элементов в сосуществующих фазах (вулканическом стекле и порфирировых вкрапленниках) показали, что коэффициент распределения  $K = C_{\text{кр}} / C_{\text{ст}}$  обычно меньше единицы при общем высоком содержании компонента в породе и, наоборот, при их низком содержании редкие элементы в виде изоморфных примесей входят в кристаллическую фазу и придают коэффициенту  $K$  значение больше единицы [16, 17]. При оптимальных эвтектидных содержаниях ( $C_{\text{опт}}$ ) элемент равномерно рассеивается в обеих фазах и тогда  $K = 1$ .

Подвижная часть элемента, как возможный источник рудного вещества, определяется из соотношения  $C_{\text{max}} - C_{\text{опт}}$ , а коэффициент отделения  $K_{\text{от}} = (C_{\text{max}} - C_{\text{опт}}) \div C_{\text{опт}}$ .

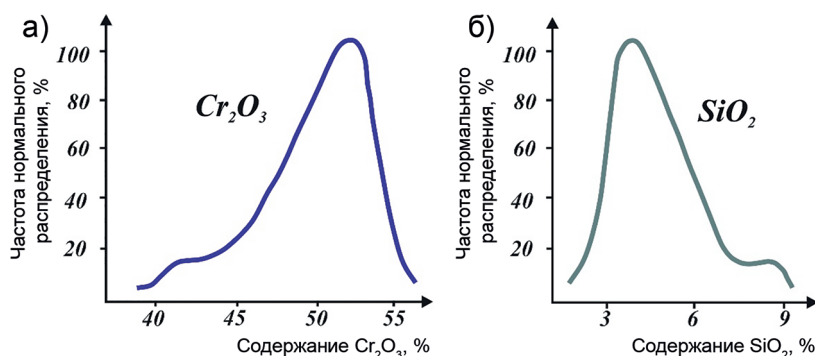


Рис. 2. Кривые распределения  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  в рудах Кемпирсайского месторождения

Fig. 2. Distribution curves of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  in the ores of the Kempirsay deposit

Изложенные выше результаты в совокупности с математическим моделированием представляют возможность оценивать содержания компонентов на начальной и конечной стадиях кристаллизации в полнокристаллических магматических и метаморфических породах. В этом случае  $K = C_1/C_2$ , где  $C_1$  содержание компонента в твердой фазе начала кристаллизации, а  $C_2$  — содержание в конечных продуктах. Отличие геохимических трендов магматического и метаморфического процессов состоит в том, что в случае кристаллизации магмы с некоторой долей условности можно полагать  $C_1 = C_{\text{мод}}$  (модальное значение на ЭКР), а  $C_2 = C_{\text{ср}}$  (среднее значение), в то время, как для метаморфических пород  $C_1 = C_{\text{ср}}$ , а  $C_2 = C_{\text{мод}}$ . Иначе говоря, в относительно закрытой системе магматического очага аномальные содержания, отличающиеся от модального, фиксируются в последних порциях расплава.

В относительно открытых метаморфических системах, наоборот, конечные продукты близки к равновесным, модальным содержаниям. Следует помнить, что прогрессивный метаморфизм протекает на фоне растущих термодинамических параметров, способных легко смещать содержания к модальным [18, 19]. Следует иметь ввиду, что модальные значения — это те концентрации, к которым стремится система при данных реальных содержаниях и соответствующих параметрах температуры и давления. В случае, если реальные содержания отвечают модальным, происходит кристаллизация эвтектоидных систем с равномерным рассеиванием компонентов и достижением максимума энтропии. Однако подобные ситуации в природе встречаются достаточно редко, обычно начало кристаллизации характеризуется котектическими реакциями. Таким образом, для магматических систем можно полагать  $K = C_1/C_2 = C_{\text{мод}}/C_{\text{ср}}$ . Для кривых

правосторонней асимметрией (включая логнормальные модели)  $C_{\text{мод}}$  всегда меньше  $C_{\text{ср}}$ , а  $K$  меньше 1. Учитывая тот факт, что ЭКР с правосторонней асимметрией для магматических пород свидетельствуют о накоплении элемента в последних порциях расплава, можно полагать их месторождения в постмагматических продуктах различных стадий: пегматитовой, пневматолитовой и гидротермальной.

Для кривых с левосторонней асимметрией, интерпретируемых в случае магматических пород как признак охотного, легкого вхождения компонента в твердую кристаллическую фазу и его нехватки на завершающих стадиях становления породы, получаем  $K = C_1/C_2 = C_{\text{мод}}/C_{\text{ср}}$ , что всегда больше единицы, коэффициент отделения  $K_{\text{от}} = ((C_{\text{мод}} - C_{\text{ср}})/C_{\text{ср}})$ , что всегда меньше 1. Подобные компоненты не могут выноситься за пределы системы и представляют собой ореолы концентрации в породе. Естественно, что поиск месторождений подобных элементов должен быть сосредоточен в пределах магматических систем, а не в их обрамлении.

Формирование продуктов ультраметаморфических преобразований в гнейсово-мигматитовых комплексах Урала сопровождается элизией редких компонентов, в то время, как в их обрамлении проявляется микроэлементная базификация. Если в пределах анатектических гранитов редкие элементы образуют ореолы рассеивания, то в базификатах, наоборот, ореолы концентрации. В отношении выводов по некоторым редким элементам следует отметить, что если аналитические материалы базируются на спектральных анализах, обладающих «порогом чувствительности» и не определяющих весь диапазон содержаний, то такие анализы не могут подвергаться математическому моделированию и должны считаться предварительными.

В случае метаморфических процессов, которые протекают в относительно открытых системах, соответствующим выражениям  $K$  можно придавать значение коэффициента концентрации —  $K_k$  и рассеяния —  $K_p$ .

Полагая  $C_1 = C_{cp}^p$ , а  $C_2 = C_{mod}$ , для распределений с правосторонней асимметрией получим  $K_p = C_1 / C_2 = C_{cp} / C_{mod}$  больше 1, а  $K_k = ((C_{mod} - C_{cp}^p)) / C_{cp}$  меньше 1 [20].

При данных обстоятельствах можно ожидать повышенную концентрацию компонента в обрамлении метаморфических комплексов с одновременно пониженными его содержаниями в самих метаморфических породах.

Для метаморфических процессов, протекающих с привнесом вещества, ЭКР характеризуются левосторонней асимметрией, а  $K_p = C_1 / C_2 = C_{cp} / C_{mod}$  меньше 1, а  $K_k = ((C_{mod} - C_{cp}^p)) / C_{cp}$  приобретает положительные значения. Такие метаморфические породы могут являться объектами поисков МПИ, а в их обрамлении маловероятной представляется возможность скопления повышенных концентраций рудного вещества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов С. В., Дриль С. И., Горячев Н. А., Левицкий И. В. Потенциальная рудопродуктивность гранитоидов Гарганской глыбы (Восточный Саян) // Геология рудных месторождений. — 2019. — Т. 61. — № 4. — С. 61–71. DOI: 10.31857/S0016-777061461-71.

2. Филатов Е. И., Филатова Л. К. Геологическая и геохимическая специализация рудоносных формаций // Отечественная геология. — 2021. — № 3-4. — С. 48–51. DOI: 10.47765/0869-7175-2021-10021.

3. Мирошникова Л. К., Мезенцев А. Ю., Семенякина Н. В., Котельникова Е. М. Геолого-геохимические признаки и критерии потенциально рудоносного Тангаралахского интрузива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 115–130. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-115-130.

4. Khayrtdinova L., Khasanov R., Badrutdinov O. Mineralogical and geochemical criteria for the stratigraphic dismemberment of metamorphic complexes of the crystalline basement of the Tatar arch (Russian Federation) // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018, vol. 18, book 1.1. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S01.033.

5. Паняк С. Г. Оценка потенциальной рудоносности кристаллических пород данными математического моделирования // Известия Уральской государственной горно-геологической академии. Серия: геология и геофизика. — 2002. — № 15. — С. 7–12.

## Заключение

В заключение отметим некоторые особенности аналитических исследований, которые требуются для использования математического моделирования и последующей надежной интерпретации полученных результатов. Главное условие, обеспечивающее надежность последующей статистической (и математической) обработки, — гомогенность проб при детальном петрографическом контроле отбираемых проб. По каждой петрографической разновидности пород необходимо иметь требуемый минимум 30 проб, лучше 100 и более. Только в этом случае ЭКР приобретают регулярность, т.е. отвечают математическим уравнениям, и унимодальность, в редких, упомянутых выше случаях, бимодальность. Для одной петрографической разновидности пород, взятой из единого блока, не может быть трех и более максимумов. Только к завершению прошлого века на Урале удалось собрать надежную аналитическую базу, позволившую сделать прорыв, иллюстрирующий реализацию философского закона перехода количественных изменений в качественные.

6. Лебедева И. А., Паняк С. Г. Методологическая оценка неопределенности прогноза запасов углеводородов Северо-Варьганского месторождения (Западная Сибирь) // Известия Уральского государственного горного университета. — 2021. — № 1(61). — С. 46–54. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-46-54.

7. Bobina T. S., Boltzyrov V. B., Panyak S. G. Use of geochemical prospecting and evaluation methods in the potentially oil-rich territories // Engineering and Mining Geophysics 2018. 2018, vol. 2018, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800481.

8. Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследований горных пород — М.: Недра, 1985. — 511 с.

9. Овчинников Л. Н. Источники рудного вещества эндогенных месторождений и надежность их установления // Источники рудного вещества эндогенных месторождений. — М.: Наука, 1976. — С. 44–52.

10. Коржинский Д. С. Понятие о геохимической подвижности элементов // Записки ВМО. — 1942. — Т. 71. — № 3-4. — С. 160–168.

11. Qingjie G., Ningqiang L., Xuan W. Using regional geochemical survey data to trace anomalous samples through geochemical genes: The Tieshanlong tungsten deposit area (South-eastern China) case study // Journal of Geochemical Exploration. 2020, vol. 219, article 106637. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106637.

12. Shelby T., Frank K., Mark D. Mineralogical thallium geochemistry and isotope variations from igneous, metamorphic, and metasomatic systems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018, vol. 243, pp. 42–65. DOI: 10.1016/j.gca.2018.09.019.

13. Петров О. В. Распределение элементов-примесей (PЗЭ + Y, Hf, U, Th, Pb) в цирконе как индикатор рудоносности магматических пород Au-Cu-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье, Дальний Восток) // Региональная геология и металлогения. — 2020. — № 84. — С. 55–70.

14. Рыкус М. В., Сначев В. И. О природе кислых пород рудовмещающего комплекса Акжарского рудного поля (Южный Урал) // Нефтегазовое дело. — 2022. — Т. 20. — № 1. — С. 6–15. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-1-6-15.

15. Округин А. В., Земнухов А. Л., Журавлев А. И. Медно-никелевое сульфидное рудопоявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2021. — Т. 26. — № 4. — С. 16–28. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28.

16. Chen Li, Manlan Niu, Xiaoyu Yuan, Zhen Yan, Qi Wu, Xiucai Li, Yi Sun Geochemical signals of coexisting magma mixing and fractional crystallization processes in the arc setting: Case study of Wulan intrusive suite in the NE Tibet Plateau // Lithos. 2022, vol. 432–433, article 106914. DOI: 10.1016/j.lithos.2022.106914.

17. Chen-Yang Sun, Peter A. Cawood, Wen-Liang Xu, Xiao-Ming Zhang, Jie Tang, Yu Li, Zhong-Xing Sun, Ting Xu In situ geochemical composition of apatite in granitoids from the eastern Central Asian Orogenic Belt. A window into petrogenesis // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2022, vol. 317, pp. 552–573. DOI: 10.1016/j.gca.2021.10.028.

18. Clemens J. D., Helps P. A., Stevens G., Petford N. Origins and scales of compositional variations in crustally derived granitic rocks: the example of the Dartmoor pluton in the Cornubian batholith of Southwest Britain // The Journal of Geology. 2021, vol. 129, no. 2. DOI: 10.1086/714174.

19. Cornet J., Rene D. Implementation of trace element behaviour in the numerical modelling of magmatic processes. Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses, 2018. Online: <http://etheses.dur.ac.uk/12534/>

20. Huang G., Palin R., Wang D., Guo J. Open-system fractional melting of Archean basalts: implications for tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG) magma genesis // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020, vol. 175, no. 102. DOI: 10.1007/s00410-020-01742-9. **PLoS**



## REFERENCES

1. Efremov S. V., Dril S. I., Goryachev N. A., Levitskiy I. V. Ore potential of granitic rocks of the Gargan Block, Eastern Sayan. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2019, vol. 61, no. 4, pp. 61 – 71. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016-777061461-71.
2. Filatov E. I., Filatova L. K. Geological and geochemical specialization of ore-bearing formations. *Otechestvennaya geologiya*. 2021, no. 3-4, pp. 48 – 51. [In Russ]. DOI: 10.47765/0869-7175-2021-10021.
3. Miroshnikova L. K., Mezentsev A. Yu., Semenyakina N. V., Kotel'nikova E. M. Geological and geochemical signs and criteria of potential mineralization in the Tangaralakh intrusion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 115 – 130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-115-130.
4. Khayrtdinova L., Khasanov R., Badrutdinov O. Mineralogical and geochemical criteria for the stratigraphic dismemberment of metamorphic complexes of the crystalline basement of the Tatar arch (Russian Federation). *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2018, vol. 18, book 1.1. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S01.033.
5. An appraisal of crystalline rocks potential ore-bearing according to mathematical modeling data. *Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy gorno-geologicheskoy akademii. Seriya: geologiya i geofizika*. 2002, no. 15, pp. 7 – 12. [In Russ].
6. Lebedeva I. A., Panyak S. G. Methodological assessment of uncertainty in forecasting hydrocarbon reserves of the North Varieganskoye field (Western Siberia). *News of the Ural State Mining University*. 2021, no. 1(61), pp. 46 – 54. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-46-54.
7. Bobina T. S., Boltyrov V. B., Panyak S. G. Use of geochemical prospecting and evaluation methods in the potentially oil-rich territories. *Engineering and Mining Geophysics 2018*. 2018, vol. 2018, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800481.
8. Efremov S. V., Stafeev K. G. *Petrokhimicheskie metody issledovaniy gornykh porod* [Petrochemical methods of rock research], Moscow, Nedra, 1985, 511 p.
9. Ovchinnikov L. N. Sources of ore matter of endogenous deposits and reliability of their establishment. *Istochniki rudnogo veshchestva endogennykh mestorozhdeniy* [Sources of ore matter of endogenous deposits and reliability of their establishment], Moscow, Nauka, 1976, pp. 44 – 52.
10. Korzhinskiy D. S. The concept of geochemical mobility of elements. *Zapiski VMO*. 1942, vol. 71, no. 3-4, pp. 160 – 168.
11. Qingjie G., Ningqiang L., Xuan W. Using regional geochemical survey data to trace anomalous samples through geochemical genes: The Tieshanlong tungsten deposit area (South-eastern China) case study. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020, vol. 219, article 106637. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106637.
12. Shelby T., Frank K., Mark D. Mineralogical thallium geochemistry and isotope variations from igneous, metamorphic, and metasomatic systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018, vol. 243, pp. 42 – 65. DOI: 10.1016/j.gca.2018.09.019.
13. Petrov O. V. REE+Y, Hf, U, Th, and Pb distribution in zircon as an indicator for fertility of magmatic rocks of the Malmyzh and Pony Cu-Au-porphyry ore fields (Trans-Amur Region, Russian Far East). *Regional Geology and Metallogeny*. 2020, no. 84, pp. 55 – 70. [In Russ].
14. Rykus M. V., Snachev V. I. About the nature of acid rocks of the ore-host complex of the akzharsky ore field (South Urals). *Neftegazovoe delo*. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 6 – 15. [In Russ]. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-1-6-15.
15. Okrugin A. V., Zemnukhov A. L., Zhuravlev A. I. Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, vol. 26, no. 4, pp. 16 – 28. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28.

16. Chen Li, Manlan Niu, Xiaoyu Yuan, Zhen Yan, Qi Wu, Xiucan Li, Yi Sun Geochemical signals of coexisting magma mixing and fractional crystallization processes in the arc setting: Case study of Wulan intrusive suite in the NE Tibet Plateau. *Lithos*. 2022, vol. 432 – 433, article 106914. DOI: 10.1016/j.lithos.2022.106914.

17. Chen-Yang Sun, Peter A. Cawood, Wen-Liang Xu, Xiao-Ming Zhang, Jie Tang, Yu Li, Zhong-Xing Sun, Ting Xu In situ geochemical composition of apatite in granitoids from the eastern Central Asian Orogenic Belt. A window into petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2022, vol. 317, pp. 552 – 573. DOI: 10.1016/j.gca.2021.10.028.

18. Clemens J. D., Helps P. A., Stevens G., Petford N. Origins and scales of compositional variations in crustally derived granitic rocks: the example of the Dartmoor pluton in the Cornubian batholith of Southwest Britain. *The Journal of Geology*. 2021, vol. 129, no. 2. DOI: 10.1086/714174.

19. Cornet J., Rene D. *Implementation of trace element behaviour in the numerical modelling of magmatic processes*. Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses, 2018. Online: <http://etheses.dur.ac.uk/12534/>

20. Huang G., Palin R., Wang D., Guo J. Open-system fractional melting of Archean basalts: implications for tonalite – trondhjemite – granodiorite (TTG) magma genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020, vol. 175, no. 102. DOI: 10.1007/s00410-020-01742-9.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Паняк Стефан Григорьевич<sup>1</sup> — д-р геол.-минерал. наук, профессор, e-mail: panjakst@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8436-639X,

Бобина Татьяна Сергеевна<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: tanyashka1993@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7790-9907,

Болтыров Владимир Босхаевич<sup>1</sup> — д-р геол.-минерал. наук, профессор, e-mail: boltyrov34@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5564-0054,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет.

**Для контактов:** Бобина Т.С., e-mail: tanyashka1993@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.G. Panyak<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor, e-mail: panjakst@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8436-639X,

T.S. Bobina<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: tanyashka1993@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7790-9907,

V.B. Boltyrov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor, e-mail: boltyrov34@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5564-0054,

<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

**Corresponding author:** T.S. Bobina, e-mail: tanyashka1993@mail.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 01.10.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 01.10.2022; accepted for printing 10.10.2022.

