



USE OF DIGITAL MODELS OF GEOLOGICAL STRUCTURE TO IDENTIFY PALEOVOLCANIC STRUCTURES CONTROLLING PORPHYRY ORE OBJECTS

S.V. Efremov ¹✉, N.A. Goryachev ^{1,2}, A.E. Budyak ¹, S.Y. Skuzovatov ¹, A.V. Blinov¹

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

² Shilo North East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 16 Portovaya St, Magadan 685000, Russia

ABSTRACT. The article is devoted to the implementation of the methodology for paleovolcanic structure analyzing using 3D visualization of the model of the geological territory structure based on the relief digital model. The approach used made it possible to identify two paleovolcanic apparatuses and their structural elements: cone fragments, explosive domes, porphyritic stocks, ring fault zones with localization of dike belts in them. This, within the framework of the evolution model of porphyry ore systems, made it possible to identify promising areas for prospecting on ore objects of a given type. The procedure was checked on the basis of geochemical survey results. The regular control by the selected structural elements of geochemical fields was shown. The analysis of the spatial position of the selected structural blocks with a certain geochemical characteristic rather well into the evolution model of the porphyry ore systems. In all cases the control of geochemical halos by porphyry stocks is noted, the material rock complexes that are fragments of the zonal stone hat of the porphyry ore object, are quite clearly distinguished. Within the area of work, three ore-magmatic systems can be identified at a low level of erosion shear, potentially accompanied by porphyry-type ore mineralization.

KEYWORDS: porphyry systems; three-dimensional geologic models; complex geochemical halos

FUNDING: The study was carried out as part of the state assignment for Project IX.130.3.1 (No. 0284-2021-0001).



EDN: IQEFKT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Sergey V. Efremov, esv@igc.irk.ru

Received: May 29, 2023

Revised: October 3, 2023

Accepted: October 13, 2023

FOR CITATION: Efremov S.V., Goryachev N.A., Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Blinov A.V., 2024. Use of Digital Models of Geological Structure to Identify Paleovolcanic Structures Controlling Porphyry Ore Objects. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0750. doi:10.5800/GT-2024-15-2-0750

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАЛЕОВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ПОРФИРОВЫЕ РУДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

С.В. Ефремов¹, Н.А. Горячев^{1,2}, А.Е. Будяк¹, С.Ю. Скузоватов¹, А.В. Блинов¹

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

² Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена реализации методики анализа строения палеовулканических структур с использованием 3D визуализации модели геологического строения территории, основанной на цифровой модели рельефа. Использованный подход позволил выделить два палеовулканических аппарата и слагающие их структурные элементы: фрагменты конуса, эксплозивные купола, штоки порфиринов, зоны кольцевых разломов с локализацией в них дайковых поясов. Это, в рамках модели эволюции порфириновых рудных систем, дало возможность выделить перспективные площади для постановки поисковых работ на рудные объекты заданного типа. Проверка методики выполнена на основании результатов геохимической съемки. Был показан закономерный контроль выделенными структурными элементами геохимических полей. Анализ пространственного положения выделенных структурных блоков с определенной геохимической характеристикой довольно хорошо укладывается в рамки модели эволюции порфириновых рудных систем. Во всех случаях отмечается контроль порфириновыми штоками геохимических ореолов, довольно ярко выделяются вещественные комплексы пород, являющиеся фрагментами зональной каменной «шляпы» порфиривого рудного объекта. В пределах площади работ можно выделить три рудно-магматические системы на малом уровне эрозионного среза, потенциально сопровождающиеся рудной минерализацией порфиривого типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: порфириновые системы; трехмерные геологические модели; комплексные геохимические ореолы

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.130.3.1 (№0284-2021-0001).

1. ВВЕДЕНИЕ

Предложенная вниманию читателей статья иллюстрирует один из подходов к решению проблем, возникающих при интерпретации результатов геохимических съемок в пределах конкретного рудного поля при поисках порфиривого рудного объекта.

Довольно часто при проведении подобных работ в пределах геохимического поля выделяются структуры, которые не удается соотнести с реальными геологическими объектами, приведенными на геологической карте. Обусловлено это разными причинами, начиная от проблем, связанных с геологическим картированием, заканчивая большей «чувствительностью» геохимических методов исследования.

В качестве примера на [рис. 1](#) приведена схематическая геологическая карта района работ и карта ассоциаций химических элементов, иллюстрирующая строение геохимического поля. При визуальном анализе этих изображений становится очевидным вывод об отсутствии внешнего сходства. Иными словами, невозможно выделить геологические структуры, контролирующие геохимические поля.

Выполненная предварительная интерпретация позволила связать выделенные ассоциации элементов с процессами регионального метасоматоза, наложенного на вулканические породы. Одна из ассоциаций была сопоставлена с процессом пропилитизации (№ 1,

[табл. 1; рис. 1](#)), вторая – с зонами щелочного метасоматоза над нескрытыми магматическими очагами (№ 2, [табл. 1; рис. 1](#)).

Учитывая сказанное выше, следует выделить шесть палеовулканических очагов, с каждым из которых потенциально может ассоциировать порфириновый рудный объект. Так ли это на самом деле, остается неясным.

Единственная хорошо выраженная палеовулканическая постройка, совпадающая с зоной интенсивного щелочного метасоматоза, расположена в пределах горы Шаман, в западной части площади карты. Для остальных выделенных ареалов метасоматических преобразований структурный контроль не очевиден.

Известно, что порфириновым рудным системам свойствен определен набор структурных элементов и вещественных комплексов, позволяющих оценить многие параметры, начиная от отнесения их к порфириновым, определения мест локализации минерализации, заканчивая уровнем эрозионного среза [[Sillitoe, 2010](#)].

К таким элементам и комплексам относятся остатки вулканической постройки, наличие штоков порфиринов, проявление определенных зон метасоматических преобразований, наличие различных типов рудной минерализации.

В данной работе, используя набор признаков для порфириновых систем, результаты геохимических поисков

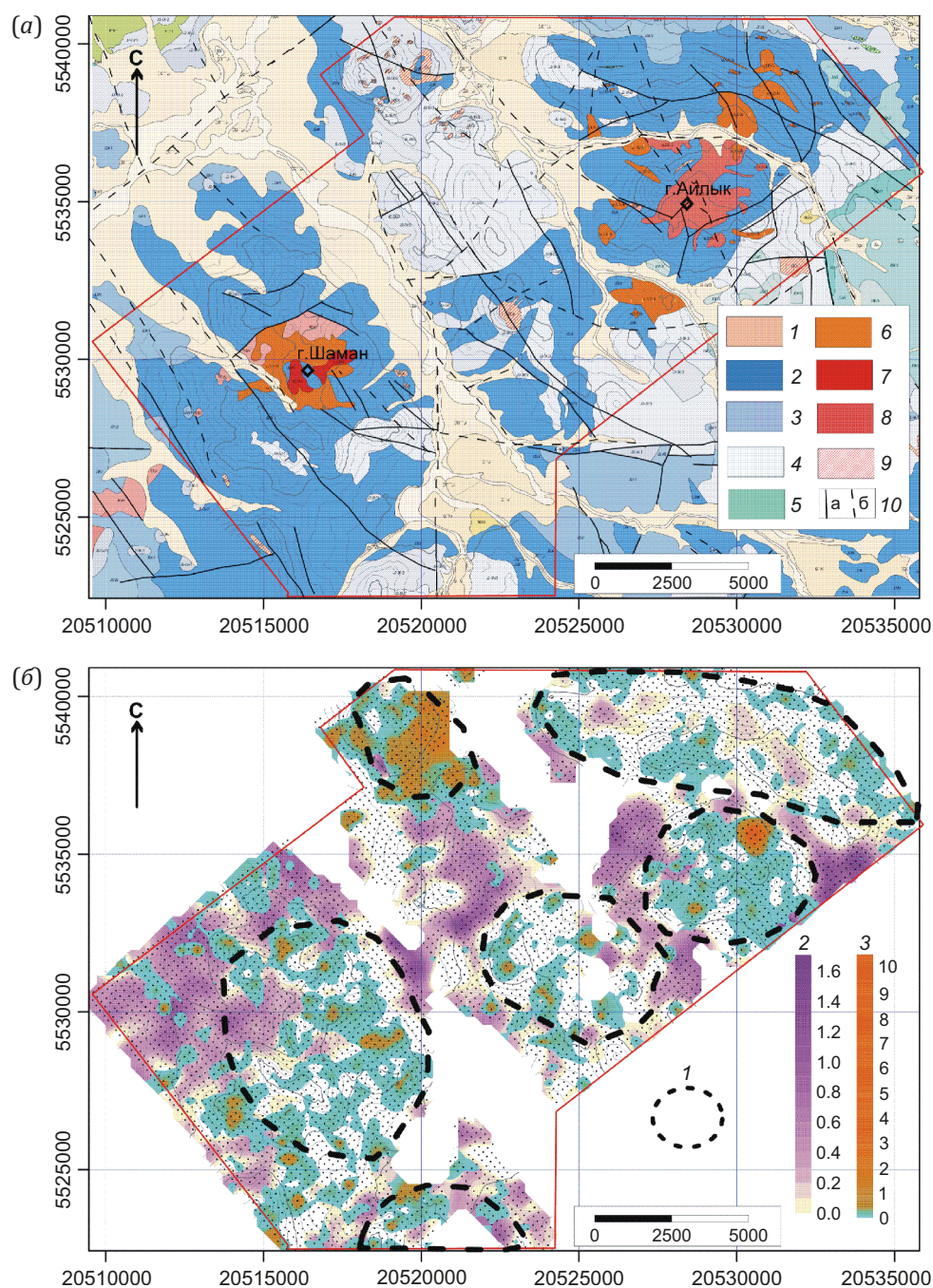


Рис. 1. Геологическая и геохимическая карты района работ.

(а) – схематическая геологическая карта: 1 – карбонаты дырбылкейской свиты (R_3); 2–5 – вулканы приаргунской серии: 2 – даикинская свита (J_2), 3 – халкитойская свита (J_2), 4 – калтанская свита ($J_{2,3}$), 5 – болбойская свита (J_3); 6–8 – гранитоиды: 6 – монцодиориты шахтаминского комплекса, 7–8 – нерчинско-заводской комплекс: 7 – гранодиориты, 8 – гранит-порфиры; 9 – субвулканические интрузии ($J_{2,3}$); 10 – разломы: а – существующие, б – предполагаемые. (б) – карта геохимических ассоциаций (табл. 1). 1 – предполагаемые контуры нескрытых магматических очагов; 2 – зона пропилитизации (табл. 1, ассоциация 1); 3 – зона щелочного метасоматоза (табл. 1, ассоциация 2). Красной линией ограничена площадь отбора геохимических проб, точками отмечены места отбора проб.

Fig. 1. Geologic and geochemical maps of the work area.

(а) – schematic geologic map: 1 – carbonates of the Dyrbylkeyskaia formation (R_3); 2–5 – volcanics of the Priargunsky series: 2 – Daikinsky formation (J_2), 3 – Khalkitoy formation (J_2), 4 – Kaltan formation ($J_{2,3}$), 5 – Bolboy formation (J_3); 6–8 – granitoids: 6 – montso-diorites of the Shakhtamin complex, 7–8 – Nerchinsko-Zavodsky complex: 7 – granodiorites, 8 – granite porphyries; 9 – subvolcanic intrusions ($J_{2,3}$); 10 – faults: а – existing, б – inferred. (б) – map of geochemical associations (Table 1, association 1); 3 – zone of alkaline metasomatism (Table 1, association 2). The red line limits the area of geochemical sampling, the dots mark the sampling locations.

Таблица 1. Выделенные ассоциации химических элементов и поставленные им в соответствие ассоциации минералов, характеризующие этапы рудного процесса

Table 1. Selected associations of chemical elements and their corresponding mineral associations characterizing the stages of the ore process

Региональный метасоматоз (уровень становление магматических тел)							
1	Na	K	Al	Be	Ta	Nb	Ba
Кварц, магнетит, альбит, калишпат, хлорит, рутил	0.79	0.72	0.49	0.29	0.28	0.24	0.23
2	P	Zr	Hf				
Апатит, циркон	0.98	0.13	0.10				
Околорудный метасоматоз (пневматолитовый этап эволюции РМС)							
3	W	Sb	Li	Cs	Ta	Nb	
Шеелит, пирит сульфосоли Sb, сфен	0.86	0.21	0.17	0.15	0.15	0.14	
4*	Cs	Tl	Li	Sb	W		
Биотит, пирит сульфосоли Sb, шеелит	0.88	0.29	0.20	0.16	0.16		
5*	Li	Tl	Cs	Sb			
Биотит, пирит сульфосоли Sb	0.74	0.13	0.11	0.10			
Околорудный метасоматоз (пневматолитовый, гидротермальный этапы эволюции РМС)							
6	As	Sb	Tl	Cs			
Пирит, сульфосоли As, Sb	0.95	0.16	0.15	0.11			
9	Bi	Tl	Te				
Пирит, теллуриды Bi	0.96	0.50	0.10				

Примечание. * – рассчитан мультипликативный комплексный показатель (4+5), характеризующий щелочной метасоматоз в рудно-магматической системе (РМС). В первом столбце – номер выделенного фактора/ассоциации элементов, ранжированных по вкладу в суммарную дисперсию выборки, и поставленные им в соответствие ассоциации минералов, характеризующих этапы становления РМС.
Note. * – multiplicative complex index (4+5) characterizing alkaline metasomatism in ore-magmatic system (OMS) was calculated. In the first column – number of the selected factor/association of elements, ranked by contribution to the total sampling variance, and the associations of minerals characterizing the stages of OMS formation.

по вторичным ореолам рассеяния и методы дистанционного изучения геологических структур, авторы статьи попытаются выделить участки, перспективные на нахождение рудной минерализации, с оценкой ее генетического типа и уровня эрозионного среза предполагаемого рудного объекта.

2. МЕТОДИКА РАБОТ

В основу методического подхода положена работа с математическими поверхностями [Davis, 1990], построенными по регулярной сети в пределах участка работ. В качестве аргументов были использованы концентрации химических элементов и комплексные показатели, полученные на их основе, а также высотные отметки.
Основой для построения математических поверхностей стала геохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния, выполненная полевым отрядом Института геохимии СО РАН по регулярной сети с шагом 200×200 м. Площадь геохимической съемки ограничена на приведенных картах красной линией, визуализация

сети опробования в виде точек дана на рис. 2, б. Геохимические пробы отбирались из делювиальных отложений из-под гумусового слоя. Концентрации химических элементов определены методом ICP-AES с разложением пробы в смеси четырех кислот в лаборатории SGS, г. Чита.
При построении математических поверхностей эта сеть была пересчитана на регулярную с шагом 100×100 м. Для расчета значения в узле сети был использован квадрантный поиск с максимальным числом точек во всех секторах, равным 64, минимальным количеством точек во всех секторах, равным 8, максимальным количеством точек, использованных для расчета в каждом секторе, равным 16. Значение в точке не рассчитывалось, если три сектора оказывались «пустыми»¹. Радиус окна для выбора точек составлял 400 м. При расчетах значений в узле сети использовалась обратнотепенная функция 1/d², где d является расстоянием от узла сети до точки. Величина степени 2 была выбрана для снижения влияния наиболее удаленных точек на рассчитанное значение.

¹ Данный параметр, наряду с радиусом окна, определяет появление «пустых» областей в плоскости карты за пределами сети опробования.

Использованный метод расчета не позволяет оценить ошибку интерполяции при построении математической поверхности, однако для достижения цели данной работы это не имеет существенного значения.

Для выделения геологических структур по изложенной выше методике была построена цифровая модель рельефа с наложенной на нее оцифрованной геоло-

гической картой района работ. В качестве аргумента были использованы значения высотных отметок, измеренных приемником GPS при отборе пробы. Качество измерений контролировалось для каждого приемника измерением в определенной точке с известными географическими координатами и высотной отметкой в начале и конце маршрута.

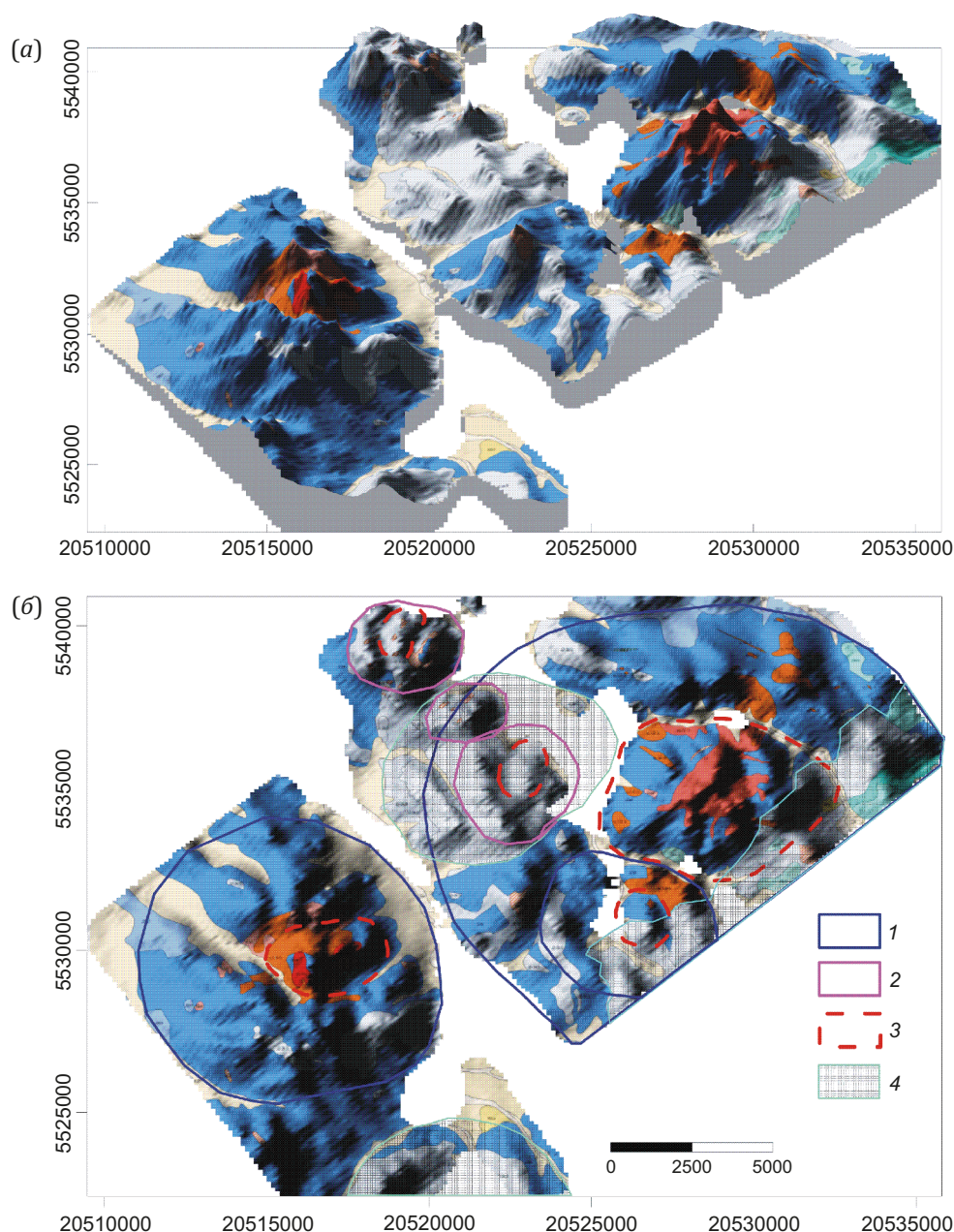


Рис. 2. Визуализация трехмерной модели рельефа с наложенной геологической картой.

(а) – ортографическая проекция (в данной проекции ось Z отсутствует ввиду ее наложения на ось ординат); (б) – проекция на горизонтальную плоскость: 1 – контуры андезитовых вулканов и паразитических куполов в их пределах (J_2); 2 – контуры дацитовых паразитических куполов, сложенных породами калтанской свиты (J_{2-3}); 3 – контуры взрывчатых куполов в центральных частях вулканических построек; 4 – депрессии, сложенные породами калтанской и болбойской свит.

Fig. 2. Visualization of 3D relief model with superimposed geological map.

(а) – orthographic projection (in this projection Z axis is absent, due to its superposition on the ordinate axis); (б) – projection on the horizontal plane: 1 – contours of andesitic volcanoes and parasitic domes within them (J_2); 2 – contours of dacite parasitic domes composed of rocks of the Kaltan formation (J_{2-3}); 3 – contours of explosive domes in the central parts of volcanic structures; 4 – depressions composed of rocks of the Kaltan and Bolboy formations.

При выявлении структур была использована «подсветка» цифровой модели рельефа, угол наклона лучей и высота источника света над горизонтом подбирались визуально в каждом конкретном случае для получения наиболее наглядного результата.

Выделение структур было выполнено при визуальном анализе полученной 3D модели с использованием метода аналогии по составу, строению и внешнему облику современных вулканических аппаратов. При выделении границ использовались состав и параметры залегания вулканических толщ, их относительное положение в рамках легенды использованной геологической карты. Полученные границы не являются абсолютными, однако использованный подход дает возможность выделить структурные элементы в порфировой системе, позволяющие оценить уровень эрозионного среза и локализацию зон, перспективных на обнаружение рудной минерализации.

Для выделения структурных элементов, характеризующих порфировую систему, была использована модель, описанная в работе [Sillitoe, 2010]. Выделялись фрагменты вулканического конуса, порфиновый шток и зоны кольцевых разломов/проницаемые зоны, его окаймляющие.

Для оценки корректности метода выделения структур была использована карта геохимических ассоциаций, сопоставленных с той или иной стадией эволюции порфировой системы. В основе этих построений лежит представление об изменении состава рудоносного флюида, отделяющегося от магматического очага с течением времени. Это изменение фиксируется отложением контрастных минеральных ассоциаций, сменяющих одна другую [Sillitoe, 2010], формирующих комплексный метасоматический/геохимический ореол.

Согласно модели, для каждого из структурных элементов свойствен свой тип метасоматических преобразований (ассоциация новообразованных минералов → ассоциация химических элементов → зона комплексного геохимического ореола). Таким образом, сопоставляя зону комплексного геохимического ореола с выделенным структурным элементом, можно говорить о соответствии построений модели эволюции порфировой системы.

Используя методы многомерной статистики, комплексный геохимический ореол можно разделить на составные части с пространственной фиксацией зон распространения минералов той или иной ассоциации, характеризующих рудный процесс. Проверка процесса разделения обычно осуществляется с помощью анализа соответствия геохимических ассоциаций ассоциациям минералов, характеризующих последовательные стадии рудообразования. Ассоциации минералов выделяются при петрографическом и минераграфическом изучении прозрачных шлифов и полировок с уточнением набора минералов и изучением их химического состава на микрозонде или электронном микроскопе.

Ассоциации химических элементов были выделены с помощью факторного анализа. Расчет факторов

проводился по корреляционной матрице, количество факторов соответствовало количеству химических элементов в матрице и было ограничено вкладом 1 % в суммарную дисперсию (более подробно в работах [Efremov, 2015; Efremov et al., 2021]).

Каждый из факторов характеризуется собственным вкладом в суммарную дисперсию и может быть сопоставлен с конкретным геологическим процессом, приводящим к «рассеиванию» данных.

В данном случае факторы представлены ассоциациями элементов с весовыми коэффициентами (факторными нагрузками, сопоставленными каждому из них, отражающими их вес в ассоциации). Как правило, набор элементов отражает набор минералов в ассоциации, а величина весовых коэффициентов – их количественные пропорции. Весовые коэффициенты в ассоциации могут быть положительными и отрицательными, указывая на существование минеральных ассоциаций – антагонистов.

Величина каждого фактора может быть оценена количественно в каждой точке геохимического поля. По сути, каждый фактор является линейным уравнением вида $\sum a_i \cdot C_i$, где a_i – весовой коэффициент, соответствующий химическому элементу i в факторе, а C_i – концентрация этого элемента в нужной точке геохимического поля. Величина i изменяется от 1 до числа химических элементов в факторе.

По этим значениям может быть построена карта распределения факторов (ассоциаций химических элементов → полиэлементная геохимическая карта), где каждая из элементных ассоциаций будет характеризовать тот или иной геологический процесс (зону комплексного геохимического ореола).

Карта ассоциаций химических элементов строится последовательным наложением слоев, характеризующих ту или иную элементную ассоциацию. Обычно выделяется базовый слой/ассоциация элементов, вносящих наибольший вклад в дисперсию выборки. Остальные слои «подрезаются» по нулевому значению (отбрасываются отрицательные значения фактора) и накладываются один на другой.

Для усиления геохимических аномалий может быть использован мультипликативный или аддитивный эффект [Matveev, Solovov, 2011], в данном случае выраженные в суммировании или перемножении математических поверхностей, характеризующих ту или иную элементную ассоциацию.

Для оценки корректности геологических построений были выбраны ассоциации химических элементов, характеризующие высокоэнергетические процессы в становлении порфировой системы: уровень становления магматических тел; контактовые процессы; пневматолитовый этап эволюции порфировой системы; высокотемпературный гидротермальный этап эволюции порфировой системы. Все эти ассоциации приведены в табл. 1.

Соответствие этих элементных ассоциаций ассоциациям минералов, характеризующих стадии рудного

процесса, были проверены с использованием методического подхода, описанного выше (ассоциации минералов даны в табл. 1). Более подробные данные об этой проверке являются результатом самостоятельной неопубликованной работы и в данной статье не приводятся.

Карты, приведенные в качестве иллюстраций, имеют прямоугольные координаты проекции Гаусса-Крюгера, система координат Пулково 1942. Карты и 3D визуализация строились с помощью программного пакета Surfer v.13.0, компании Golden Soft. Для статистических пересчетов использовалась программа Statistica v.10 компании StatSoft. Шкалы измерений на масштабных линейках даны в метрах.

3. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геологическое строение района работ. Район работ расположен в пределах Восточного Забайкалья. Он приурочен к мезозойской вулканической депрессии в пределах Аргунского террейна. На площади работ наибольшее распространение свойственно изверженным породам. Они представлены вулканитами приаргунской серии (J_{2-3}), гранитоидами шахтаминского (J_{2-3}) и нерчинско-заводского (J_{2-3}) комплексов (см. рис. 1, а). Осадочные породы развиты крайне ограниченно и представлены карбонатами дырбылкейской свиты (R_3).

Из-за относительно слабой расчлененности рельефа, практически полного отсутствия коренных обнажений и противоречивых результатов картирования вулканических толщ по делювиальным развалам выделение геологических структур является проблематичным. Более или менее уверенно могут быть выделены только границы вулканических депрессий, сложенных разными по составу породами.

Согласно геологической карте, разрывные нарушения проявлены слабо, однако это свидетельствует не об их отсутствии, а о проблемах с их выделением. Об их присутствии свидетельствуют линейные зоны, выполненные четвертичными отложениями, ориентированные параллельно главным тектоническим швам (вне масштаба геологической карты), либо кольцевые отрицательные формы рельефа, ограничивающие штоки гранитоидов. Эти сложности в выделении геологических структур послужили стимулом для использования апробируемой методики.

Визуально в плоскости карты выделяется только одна палеовулканическая постройка в пределах горы Шаман. Ее основание сложено андезитами даикинской свиты (J_2), в центральной части постройки выделяются два «вложенных» штока гранитоидов шахтаминского и нерчинско-заводского комплексов, рассматриваемых в качестве порфириров.

В центральной и восточной части площади отмечается широкое развитие полей андезибазальтов и андезитов даикинской свиты, прорванных штоками гранитоидов шахтаминского и нерчинско-заводского комплексов. В северной и южной части площади отме-

чается развитие тектонических депрессий, заполненных лавами и туфами трахиандезитов, дацитов и риолитов, относимых к калтанской (J_{2-3}) и болбойской (J_3) свитам. Однако прямых визуальных признаков присутствия здесь палеовулканической постройки нет.

При анализе 3D визуализации в пределах рассматриваемой территории выделяются две крупные вулканические постройки, сложенные андезитами даикинской свиты, осложненные серией небольших паразитических куполов, сложенных породами калтанской свиты (рис. 2, а). Вулканическая постройка в районе горы Шаман значительно эродированна. Тем не менее в южной части постройки остался фрагмент вулканического конуса, сложенного андезитами с остатками крутопадающих покровов вулканитов калтанской свиты на его поверхности. Северная часть постройки более эродированна, в ее пределах вскрыт фундамент вулкана, представленный карбонатными отложениями дырбылкейской свиты (см. рис. 1; рис. 2, б).

В ядре вулканической постройки выходит субвулканическая интрузия андезитов, прорванная штоками порфириров, относимых к шахтаминскому и нерчинско-заводскому комплексам. Центральная часть вулканической постройки окружена отрицательными формами рельефа, скорее всего фиксирующих ослабленную зону, развитую по контракционным кольцевым трещинам. Подобные зоны формируются в результате просадки при уменьшении объема раскристаллизованного магматического очага. По внешним морфологическим признакам это полигенный андезитовый вулкан центрального типа с экструзивным куполом в центральной части [Markhinin, 1985]. Диаметр вулкана около 5 км, высота конуса, с учетом углов склонов для андезитовых вулканов в 25–30°, составляет около 1.5 км от основания.

В восточной части площади расположена более крупная и более эродированная вулканическая постройка, имеющая аналогичные морфологические особенности (центр в районе горы Айлык). Она также может рассматриваться как андезитовый вулкан центрального типа с экструзивным куполом в центральной части. Диаметр вулкана около 15 км, высота конуса от основания составляет около 3 км. По форме и размеру он соответствует современному вулкану Толбачек, расположенному на Камчатском полуострове.

Как было отмечено ранее, эта вулканическая постройка разрушена в большей степени. В ее пределах сохранились отдельные фрагменты вулканического конуса в юго-западной и северо-восточной части. Эксплозивный купол расположен в центральной части вулкана, представлен субвулканической интрузией андезитов, прорванных штоками гранитоидов шахтаминского и нерчинско-заводского комплексов. Эксплозивный купол, как и в предыдущем случае, окружен отрицательными формами рельефа, скорее всего фиксирующими зону кольцевых разломов.

В южной части андезитовой вулканической постройки может быть выделен паразитический конус, также

имеющий эксплозивный купол в центральной части, окруженный отрицательными формами рельефа (зонами кольцевых разломов) (рис. 2, б).

Вулканическая постройка была значительно преобразована более молодыми геологическими процессами. Ее юго-восточный фланг был срезан зоной разломов, ограничивающих депрессию, заполненную вулканами калтанской и болбойской свит. На северо-западном фланге также выделяется депрессия, заполненная вулканами калтанской свиты. Судя по форме геологического тела и элементам залегания подошвы вулканического покрова², ее можно рассматривать как кальдеру, осложненную паразитическими вулканическими куполами. Аналогичная кальдера выделена в южной части площади. Паразитические конусы имеют неплохую сохранность, диаметр основания от 1 до 3 км и эксплозивный купол в центральной части.

Рассмотренный материал позволяет выделить главные структурные элементы в пределах эродированных вулканических аппаратов. Подобная работа является важной при анализе строения порфировых рудных систем. Обусловлено это тем, что для каждого структурного элемента вулканоплутонической системы, сопровождаемой порфировой минерализацией, свойствен свой собственный набор типов руд и метасоматических преобразований. Это позволяет вести целенаправленные поиски рудной минерализации и оценивать перспективы предполагаемого рудного объекта.

В данном случае эта особенность используется для иллюстрации применения предложенной методики дистанционного выявления геологических структур. В качестве критериев верификации использованы геохимические поля, фиксирующие тот или иной этап эволюции порфировой рудной системы. Их контроль определенными структурными элементами позволит говорить о ее корректности. Составленная схема структурных элементов вулканических аппаратов приведена на рис. 3, использованные ассоциации химических элементов – в табл. 1.

На схеме выделены фрагменты конусов андезитовых вулканов с разным уровнем эрозии³, выход фундамента вулканического аппарата горы Шаман, эксплозивные купола, ограниченные зонами кольцевых разломов, границы порфировых штоков и окружающих их дайковых полей (рис. 3, а).

Перед началом анализа приведем некоторые сведения об эволюции порфировой рудной системы (обзор дан в работе [Sillitoe, 2010]). В основу метасоматической и рудной зональности порфировых систем положены представления о составе и фазовом состоянии флюида, отделяющегося от магматического очага. На ранних этапах это высокоплотный низкосолёный флюид [Rusk et al., 2004, 2008] с высокими концентра-

циями Cu, Mo, Au [Heinrich, 2005; Audétat et al., 2008], формирующий богатую минерализацию в нижних частях штока порфиринов.

При латеральной и вертикальной миграции (смене РТ-условий) флюид разделяется на паровую фазу [Fournier, 1999], обогащенную Cu, Au, Sb, As, W, Te, редкими щелочными элементами [Heinrich, 2005; Pokrovski et al., 2009; Pudack et al., 2009], и высокосолёный водный раствор [Burnham, 1979; Webster, 1992; Bodnar, 1995], обогащенный Mo, Fe, Zn, Pb, Mn [Bodnar, 1995]. Это приводит к формированию вертикальной и латеральной рудной и метасоматической зональности относительно порфирового штока, которая может быть зафиксирована с помощью площадных геохимических съемок.

На ранней стадии процесса (около 500 °C [Sillitoe, 2010]) паровая фаза будет формировать площадной ореол, соответствующий по размеру проекции магматического очага на дневную поверхность – источника порфиринов и рудных флюидов (пневматолитовый этап, калиевый метасоматоз в терминах российской геологической школы). В верхней части системы они формируют высокотемпературную каменную «шляпу» (lithocap), часто сохраняющуюся в пределах наземной вулканической постройки [Sillitoe, 2010].

Непосредственно рудный этап фиксируется по отложению минералов меди и сопутствующих химических элементов. Ассоциация минералов определяется РТ-условиями и степенью окисленности флюидной системы [Sillitoe, 2010]. Наиболее интересными для нас являются минеральные ассоциации, отлагающиеся выше зоны сульфидации (подошвы «литокэпа»), представленные сульфосолями Sb, As, теллуридами Bi, Pb, позволяющие говорить об уровне эрозионного среза системы.

Далее будет рассмотрен пространственный контроль выделенными структурными элементами геохимических полей, представленных ассоциациями химических элементов (табл. 1). В качестве примера используется вулканическая постройка горы Шаман.

На рис. 3, б, приведена геохимическая карта, содержащая поле распространения комплексного геохимического показателя, фиксирующего распространение редких щелочных элементов (биотитизация). Наиболее контрастные зоны ореола слагают «кольцо» вокруг штока порфиринов. Ореол проявлен в пределах всех выделенных блоков, включая порфировый шток, и довольно близок к размерам вулканической постройки. Он вполне может быть соотнесен с пневматолитовым ореолом, фиксирующим ранние этапы становления порфировой рудной системы.

Геохимический ореол ассоциации № 6 в табл. 1 (As, Sb, Tl, Cs) также стремится к кольцевой форме (рис. 3, в),

² Построена по пересечению границ геологических тел вулканитов свиты и изолиний рельефа, не приведена на рисунках.

³ Разделение эродированной и неэродированной части конуса проводилось по водораздельным линиям. Формально, внешнюю часть конуса авторы считают неэродированной, внутреннюю – эродированной.

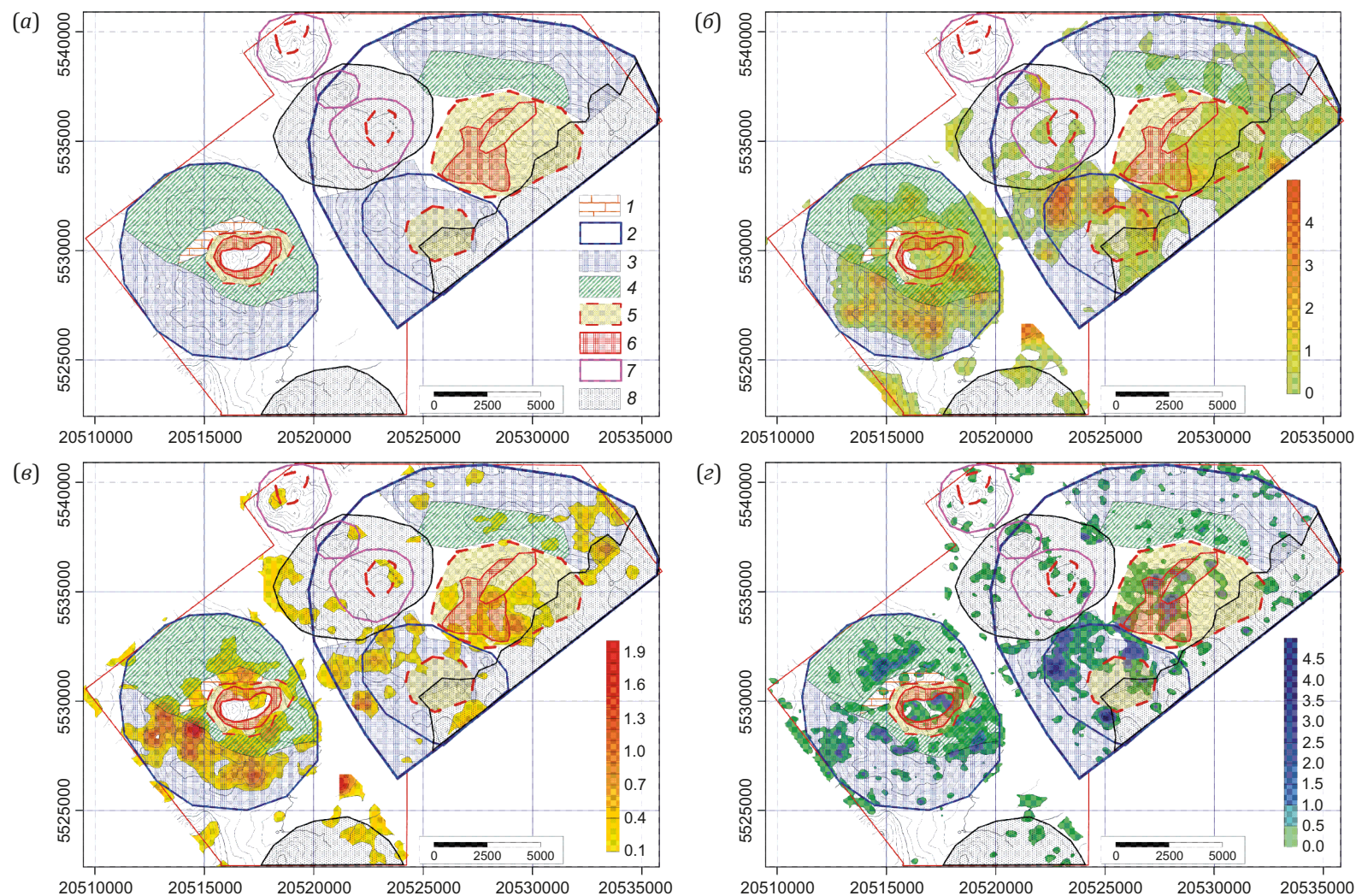


Рис. 3. Выделенные геологические блоки в пределах вулканических построек и геохимические ореолы, локализованные в их пределах.

(а) – выделенные геологические блоки: 1 – выход фундамента вулкана; 2 – контуры андезитовых вулканов; 3 – фрагменты внешнего конуса вулканов; 4 – блоки эродированного конуса вулканов; 5 – взрывные купола и зоны кольцевых разломов; 6 – порфировые штоки и связанные с ними дайковые поля; 7 – купола дацитовых вулканов; 8 – депрессии, заполненные вулканитами калтанской и болбойской свит; (б) – зоны щелочного метасоматоза (комплексный показатель, сумма ассоциаций 4 и 5 из [табл. 1](#)). Здесь и далее дана цветная шкала, характеризующая интенсивность процесса; (г) – геохимические поля ассоциации № 6 из [табл. 1](#); (з) – геохимические поля ассоциации № 3 из [табл. 1](#).

Fig. 3. Allocated geological blocks within volcanic structures and geochemical halos localized within them.

(а) – selected geologic blocks: 1 – outcrop of the volcano basement; 2 – contours of andesite volcanoes; 3 – fragments of the outer cone of volcanoes; 4 – blocks of the eroded cone of volcanoes; 5 – explosive domes and ring fault zones; 6 – porphyry stocks and associated dike fields; 7 – domes of dacite volcanoes; 8 – depressions filled with volcanites of the Kaltan and Bolboy formations; (б) – zones of alkaline metasomatism (complex index, sum of associations 4 and 5 from [Table 1](#)). Hereinafter, the color scale characterizing the intensity of the process is given; (г) – geochemical fields of association № 6 from [Table 1](#); (з) – geochemical fields of association № 3 from [Table 1](#).

косвенно указывая на его контроль штоком порфири-тов. Наиболее контрастные зоны ореола расположе-ны в пределах малоэродированного фрагмента конуса вулканического аппарата. По сути, он фиксирует верх-нюю часть зональной каменной «шляпы».

Следующий ореол (рис. 3, г) представляет ассоциа-цию № 3 в табл. 1 (W, Sb, Li, Cs, Ta, Nb), которая фикси-рует минерализацию непосредственно над границей сульфидации. Ореол также приближается к кольце-вой форме с преимущественным расположением кон-трастных полей в пределах эродированного фрагмен-та конуса вулканического аппарата и штока порфири-тов. В российской геологической школе он может быть связан с зоной грейзенизации над куполом гранито-идной интрузии. Аналогичное распространение свой-ственно полям ассоциации № 9 в табл. 1, контролиру-ющим распределение теллуридов висмута (не показан на карте).

По сути, геохимические аномалии и их приурочен-ность к определенным структурным блокам свиде-тельствуют о вскрытии зональной каменной «шляпы», связанной с порфировой рудной системой. Отмечается довольно четкий пространственный контроль анома-лий, фиксирующих рудный процесс порфировым што-ком (табл. 1, № 3, 6, 9) и вскрытие корней надрудной зоны (табл. 1, ассоциация № 3).

Аналогичные выводы можно сделать и при анализе контроля геохимических ореолов структурными эле-ментами вулканического аппарата горы Айлык. К при-меру, геохимические поля пневматолитового этапа до-вольно широко распространены в пределах остатка конуса вулкана. В пределах выделенного паразити-ческого купола они слагают контрастную кольцевую аномалию вокруг эксплозивного купола.

В эксплозивном куполе вулкана Айлык они имеют линейный характер и тяготеют к его восточной части, скорее всего фиксируя его поднятую часть.

Геохимические поля ассоциации № 6 развиты в пре-делах остатка конуса вулкана Айлык (рис. 3, в). В пре-делах его эксплозивного купола они также тяготеют к его восточной части.

Геохимические поля ассоциации № 3 в пределах паразитического купола вулкана Айлык имеют близ-кую к кольцевой форму, облекая эксплозивный купол (рис. 3, г). В пределах эксплозивного купола вулкана Айлык они тяготеют к его западной части, фиксируя существование поднятого и опущенного блоков в его пределах. В целом, для эксплозивного купола вулка-на Айлык также просматривается контроль порфиро-вым штоком геохимических полей.

Как и в случае с вулканом Шаман, выделенные струк-туры в пределах вулкана Айлык являются перспектив-ными на обнаружение промышленной минерализа-ции порфирового типа. Для них свойствен отчетливый контроль геохимических полей предполагаемыми пор-фировыми интрузиями и невысокий уровень эрози-онного среза выше границы сульфидации (надрудной зоны медно-порфирового оруденения).

В целом, можно отметить закономерное расположе-ние, согласно модели эволюции порфировых рудных систем, геохимических полей в пределах выделенных структурных элементов вулканических построек, что при совместном анализе позволяет выделить перспек-тивные участки для постановки поисковых работ и оценить уровень эрозионного среза предполагаемых рудных объектов.

Анализируя имеющиеся данные, можно вполне уве-ренно заявить, что рассматриваемые рудно-магмати-ческие системы развиваются как порфировые и впол-не могут содержать рудные объекты данного типа на малом уровне эрозионного среза. С учетом четко про-явленного в подобных системах контроля минерали-зации контактовыми зонами порфировых интрузий не составляет труда выделить области для постанов-ки дальнейших поисковых работ.

Приведенный пример показывает, что использо-ванная методика выделения структур может быть по-лезна на начальных этапах проведения геологических работ по поиску рудных объектов известного генетиче-ского типа. Используя генетическую модель, выделяя описываемые структурные элементы и вещественные комплексы, можно вполне уверенно выделять участки, перспективные на обнаружение промышленных руд-ных объектов заданного типа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика основана на анализе 3D ви-зуализации модели геологического строения террито-рии. Она позволила уточнить геологическое строение и выделить два палеовулканических аппарата, являю-щихся потенциальным источником рудной минерали-зации порфирового типа.

В пределах вулканических аппаратов были выделе-ны структурные элементы: фрагменты конуса, экспло-зивные купола, штоки порфири-тов, зоны кольцевых разломов с локализацией в них дайковых поясов.

В рамках модели эволюции порфировых рудных систем эти структурные элементы дают возможность выделить площади, перспективные для постановки дальнейших поисковых работ.

Проверка методики была выполнена с использова-нием результатов геохимических съемок по вторич-ным ореолам рассеяния. Был показан закономерный контроль выделенными структурными элементами самостоятельных зон комплексного геохимического ореола.

Анализ пространственного положения выделенных блоков с определенной геохимической характери-стикой хорошо укладывается в рамки модели эволюции порфировых рудных систем. Во всех случаях отмеча-ется контроль порфировыми штоками геохимических ореолов, хорошо выделяются вещественные комплек-сы пород, являющиеся фрагментами зональной камен-ной «шляпы».

В пределах площади работ может быть выделе-но три рудно-магматические системы, потенциально

сопровождающиеся рудной минерализацией порфирового типа.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Audétat A., Pettke T., Heinrich C.A., Bodnar R.J., 2008. The Composition of Magmatic-Hydrothermal Fluids in Barren and Mineralized Intrusions. *Economic Geology* 103 (5), 877–908. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.5.877>.

Bodnar R.J., 1995. Fluid-Inclusion Evidence for a Magmatic Source for Metals in Porphyry Copper Deposits. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series* 23, 139–152.

Burnham C.W., 1979. Magmas and Hydrothermal Fluids. In: H.L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley & Sons, New York, p. 71–136.

Davis J.C., 1990. Statistical Analysis in Geology. Book 2. Nedra, Moscow. 427 p. (in Russian) [Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. М.: Недра, 1990. Кн. 2. 427 с.].

Efremov S.V., 2015. Allocation of Ore Stage Halos Based on the Results of Geochemical Surveys. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology Prospecting and Exploration of Ore Deposits* 51 (2), 19–25 (in Russian) [Ефремов С.В. Выделение ореолов рудных стадий по результатам геохимических съемок // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. Т. 51. № 2. С. 19–25].

Efremov S.V., Spiridonov A.M., Goryachev N.A., Budyak A.E., 2021. Evolution of the Kara Ore-Magmatic System (Eastern Transbaikalia, Russia): Experience in Applying Small-Scale Geochemical Survey. *Geology of Ore Deposits* 63, 257–268. <https://doi.org/10.1134/S1075701521030041>.

Fournier R.O., 1999. Hydrothermal Processes Related to Movement of Fluid from Plastic into Brittle Rock in the Magmatic-Epithermal Environment. *Economic Geology* 94 (8), 1193–1211. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1193>.

Heinrich C.A., 2005. The Physical and Chemical Evolution of Low-Salinity Magmatic Fluids at the Porphyry to Epithermal Transition: A Thermodynamic Study. *Mineralium Deposita* 39, 864–889. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0461-9>.

Markhinin E.K., 1985. *Volcanism*. Nedra, Moscow, 288 p. (in Russian) [Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.].

Matveev A.A., Solovov A.P., 2011. *Geochemical Methods of Prospecting for Mineral Deposits*. University Book House, Moscow, 564 p. (in Russian) [Матвеев А.А., Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: КДУ, 2011. 564 с.].

Pokrovski G.S., Tagirov B.R., Schott J., Hazemann J.-L., Proux A., 2009. A New View on Gold Speciation in Sulfur-Bearing Hydrothermal Fluids from in Situ X-Ray Absorption Spectroscopy and Quantum-Chemical Modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73 (18), 5406–5427. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.007>.

Pudack C., Halter W.E., Heinrich C.A., Pettke T., 2009. Evolution of Magmatic Vapor to Gold-Rich Epithermal Liquid: The Porphyry to Epithermal Transition at Nevados de Famatina, Northwest Argentina. *Economic Geology* 104 (4), 449–477. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.449>.

Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H., 2008. Fluid Inclusion Evidence for Magmatic-Hydrothermal Fluid Evolution in the Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Butte, Montana. *Economic Geology* 103 (2), 307–334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.2.307>.

Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H., Klemm L.M., Heinrich C.A., 2004. Compositions of Magmatic Hydrothermal Fluids Determined by LA-ICP-MS of Fluid Inclusions from the Porphyry Copper-Molybdenum Deposit at Butte, MT. *Chemical Geology* 210 (1–4), 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.011>.

Sillitoe R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology* 105 (1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>.

Webster J.D., 1992. Fluid-Melt Interactions Involving Cl-Rich Granites: Experimental Study from 2 to 8 kbar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56 (2), 659–678. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90088-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90088-Z).