

УДК 553.08

А.А. Бурмистров<sup>1</sup>, И.В. Викентьев<sup>2</sup>, Е.И. Ярцев<sup>3</sup>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПЕТРОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТАМОРФОГЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И РУД ДЖУСИНСКОГО КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

На основе сравнения химического состава и ряда петрофизических и термодинамических параметров в разной степени измененных синрудных и пострудных девонских габброидов Джусинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Южный Урал) показана принципиальная возможность количественной оценки степени их преобразований, связанных с проявлением гидротермального поствулканического и динамического метаморфизма.

**Ключевые слова:** структурно-петрофизический анализ, метаморфизм, энтропия, удельная теплоемкость, масса атома.

Based on a comparison of the chemical composition and a number of petrophysical and thermodynamic parameters of changed to varying degrees syn-ore and post-ore Devonian gabbroids of the Dzhusa pyrite-polymetallic deposit (South Ural), the principal possibility of quantifying the grade of their alteration and transformation related with the hydrothermal post-volcanic and dynamic metamorphism is shown.

**Keywords:** structural-petrophysical analysis, metamorphism, entropy, specific heat capacity, atom mass.

**Введение.** В основе структурно-петрофизического анализа, разработанного профессором В.И. Старостиным и в дальнейшем широко используемого в изучении и оценке рудных месторождений различных типов [Бурмистров и др., 2009], лежит фундаментальная теоретически обоснованная и инструментально проверенная закономерная количественная зависимость величин различных петрофизических свойств пород и руд от их состава и структуры, что является следствием процессов их образования и наложенных изменений. Ключевые аспекты происхождения колчеданных залежей остаются дискуссионными, включая условия метаморфизма руд, участие в нем гидротермальных флюидов и их состав. Наблюдаемые признаки эпигенетического образования скоплений сульфидов можно объяснить метаморфогенным преобразованием колчеданных залежей в результате ремобилизации ранних вулканогенных сульфидных руд с дальнейшим их концентрированным отложением [Викентьев, 1995; Смирнов, 1989; Добрецов ред., 1987; Starostin et al., 1989]. В целом метаморфизм колчеданоносных вулканогенных формаций Урала невысокий и в основном соответствует пренит-пумпеллиитовой

фации; в районе Карабаша метаморфизм достигает максимума (эпидот-амфиболитовая и амфиболитовая фации). Степень преобразования колчеданных месторождений коррелирует с фациями метаморфизма пород [Vikentyev et al., 2016].

На большинстве крупных месторождений Урала (Гайское, Дегтярское, Учалинское, Ново-Учалинское, Сибайское) есть признаки наложенного динамометаморфизма, вплоть до появления гнейсовидных текстур и признаков пластического течения сульфидов. Роль метаморфического преобразования крупных колчеданных тел с локальным перераспределением химических элементов с обогащением Cu и особенно Zn их краевых частей и верхних выклинок (по восстанию крутопадающих линз) показана как для объектов Тагильской мегазоны, так и для Южного Урала [Vikentyev et al., 2016]. Более сильный метаморфизм, вплоть до частичного плавления, испытали руды месторождений Тарньер, Весеннее и имени 50-летия Октября (Коктау).

Джусинское колчеданно-полиметаллическое месторождение (рис. 1, 2) приурочено к центральной части Теренсайской антиклинали, входящей в Джусинско-Домбаровский палеовулканический

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, доцент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: alek.burmistroff2017@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии РАН, гл. науч. с., докт. геол.-минер. н.; e-mail: ilyavikentev@rambler.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: evgenyrtsev@mail.ru

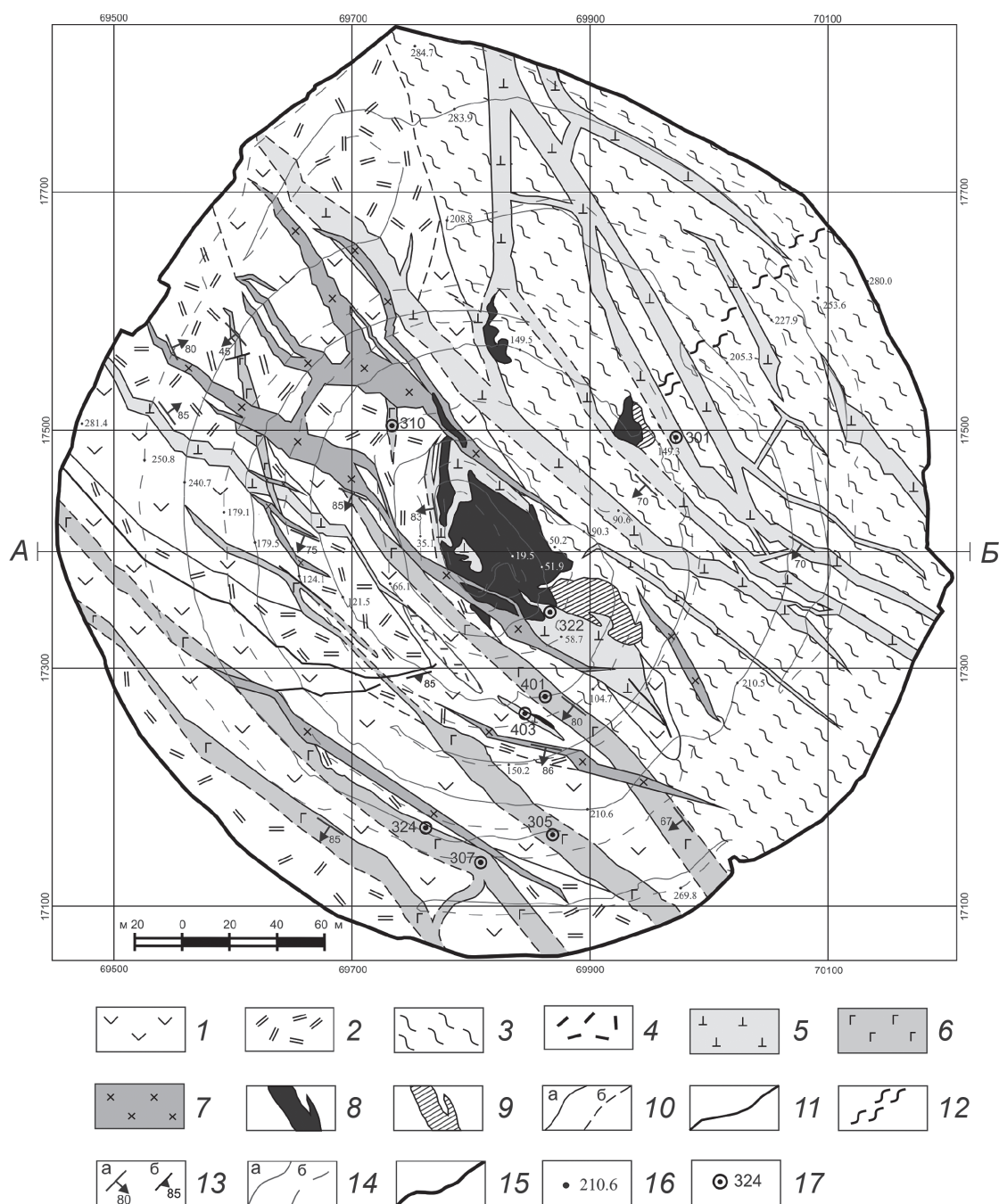


Рис. 1. Геологическая карта карьера Джусинского месторождения по состоянию горных работ на 2015 г., по [Ярцев и др., 2018]: 1 — андезиты; 2 — дациты; 3 — кварц-серицитовые метасоматиты; 4 — субвулканические дациты; 5–6 — тела раннейфельско-раннежигетского габбро-порфирового субвулканического комплекса: 5 — предрудные раннейфельские, 6 — позднерудные раннежигетские; 7 — дайки раннекаменноугольного магнитогорского диоритового комплекса; 8 — колчеданно-полиметаллические руды; 9 — серноколчеданные руды; 10 — геологические границы (а — достоверные, б — предполагаемые); 11 — разрывные нарушения; 12 — зона повышенной трещиноватости; 13 — элементы залегания (а — контактов даек и рудных тел, б — разрывных нарушений); 14 — границы уступов карьера (а — бровки уступов, б — подножия откосов); 15 — контуры карьера; 16 — абсолютные высотные отметки; 17 — точки отбора проб даек. А — Б — линия профиля

пояс Южного Урала [Ярцев, 2018; Ярцев и др., 2018]. Рудовмещающая нижняя толща верхнекарамалыташской подсуиты на участке Джусинского месторождения существенно лавовая, дацитового состава с подчиненным количеством андезитов. Она прорвана телами габбро-порфирового субвулканического и дайками раннекаменноугольного магнитогорского диоритового комплексов. Место-

рождение образовано серией изолированных одна от другой неправильно-линзовидных рудных залежей северо-западного простирания (рис. 1). Главная масса залежей тяготеет к границе андезидацитов и кварц-серицитовых метасоматитов. Текстуры руд преимущественно массивные, полосчатые, реже брекчиевидные и прожилково-вкрапленные [Viken-tyev et al., 2016].

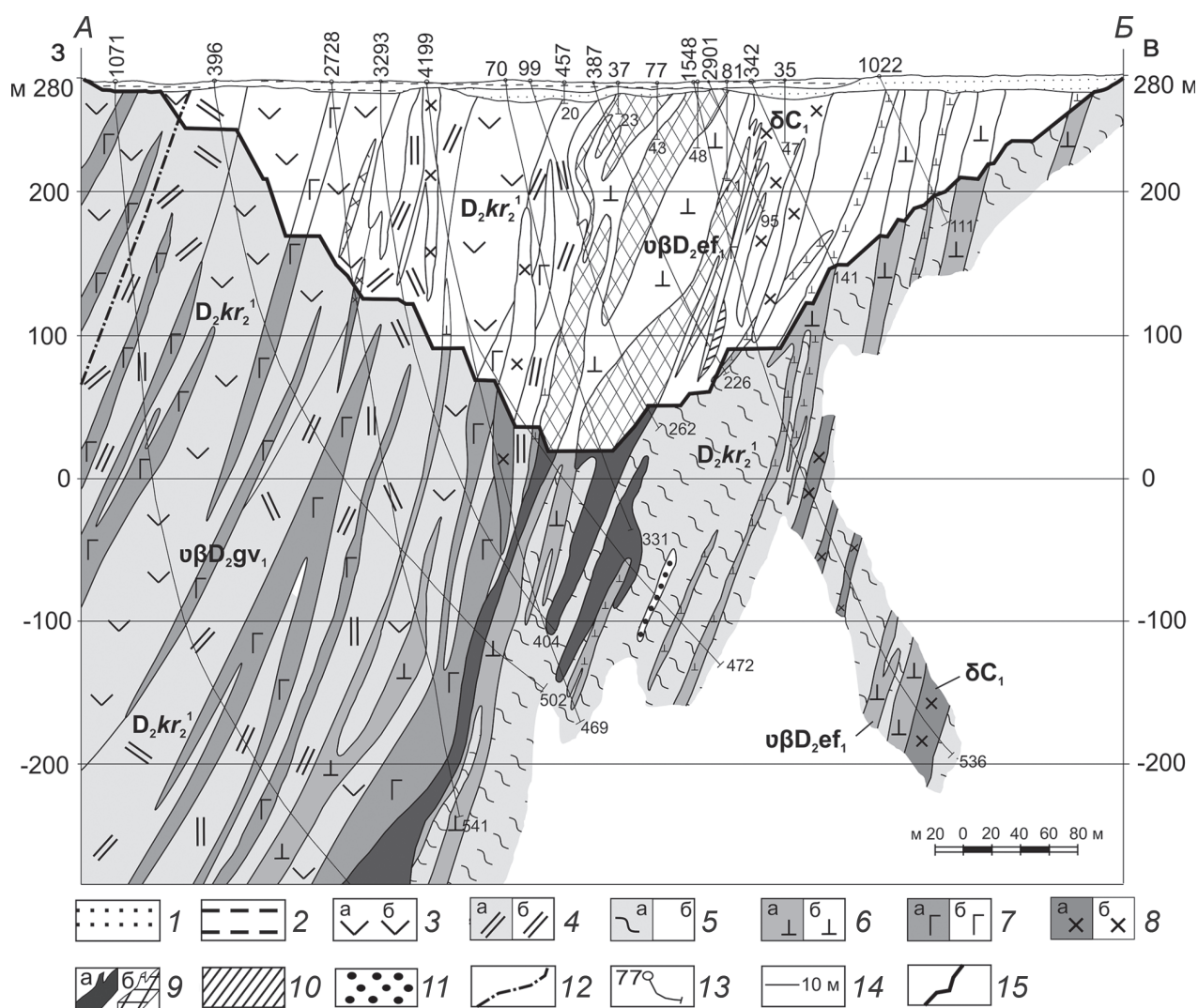


Рис. 2. Геологический разрез к карте карьера Джусинского месторождения по состоянию на 2015 г., по [Ярцев, 2018]: 1 — суперси; 2 — глины; 3 — андезиты; 4 — дациты; 5 — кварц-серицитовые метасоматиты; 6–7 — тела раннеэфельско-раннеживетского габбро-порфирового субвулканического комплекса (6 — предрудные, 7 — позднерудные); 8 — дайки раннекаменноугольного магнитогорского диоритового комплекса; 9 — колчеданно-полиметаллические руды (а — в недрах, б — отработанные); 10 — серноколчеданные руды; 11 — вкрапленные руды; 12 — разрывные нарушения; 13 — скважины; 14 — горизонты над уровнем моря; 15 — контур карьера по состоянию на 2015 г. Без заливки показана отработанная часть месторождения

Джусинское месторождение отличается крайне сложной историей формирования. Промышленное содержание Pb и Ba (в дополнение к Cu и Zn) в рудах, повышенная щелочность рудовмещающих вулканитов, обилие разновозрастных субвулканических и интрузивных тел (в некоторых местах в карьере дайковых пород больше, чем вмещающих метавулканитов), интенсивный разноплановый метаморфизм [Vikentyev et al., 2016], все это индивидуализирует Джусинское месторождение как уникальный колчеданно-полиметаллический объект [Ярцев и др., 2018, 2019]. Сжимающие напряжения, зафиксированные бороздами скольжения, с одной стороны, приводили к растворению рудных минералов под давлением и переотложению рудного вещества метаморфогенными флюидами, а с другой — к перераспределению сульфидной массы в результате пластической деформации рудных тел.

Повышенная концентрация наиболее пластичного сульфида — галенита (до 2–3 об.%), особенно по сравнению с другими южноуральскими объектами, высокое содержание халькопирита (до 20 об.%), второго по пластичности, а также обилие структур цементации сфалеритом наименее пластичного и наиболее хрупкого пирита дают основание полагать, что второй механизм перераспределения вещества преобладал. Активизация метаморфогенных флюидов происходила в зонах трещиноватости главным образом северо-западного и меридионального направлений. Образование вертикальных рудных столбов, сложенных богатыми рудами, стало результатом проявления процессов ремобилизации руд, связанной с их пластической деформацией, а также с переотложением сульфидов Cu, Pb и Zn метаморфическим флюидом [Ярцев и др., 2017, 2018]. Метаморфическая природа флюидов под-



черкнута их высоким давлением (до 1.5 кбар) [Ярцев и др., 2017].

**Материалы и методы исследования.** Измерены значения и проанализированы закономерности изменения следующих петрофизических свойств и термодинамических параметров образцов двух позднедевонских комплексов субвулканических тел и даек основного состава (11 образцов) и руд (1 образец) этого месторождения, в разной степени преобразованных процессами гидротермального поствулканического метаморфизма и регионального динамометаморфизма: плотности пород ( $d$ , г/см<sup>3</sup>) и плотности их твердой фазы ( $d_T$ , г/см<sup>3</sup>), эффективной пористости ( $P_{эф}$ , %), изохорной удельной теплоемкости ( $C_p$ , Дж/кг·К), температуры Дебая пород и их твердой фазы ( $TD$  и  $TD_T$ , К), удельной энтропии ( $S$ , Дж/кг·К, Дж/см<sup>3</sup>·К). Признаки проявления этих

процессов на месторождении детально изучены и освещены в наших более ранних работах [Ярцев, 2018; Ярцев и др., 2018; Vikentyev et al., 2016]. В участках с дайками образцы отбирали по нескольким профилям на разных расстояниях от их контакта с рудным телом, два из которых приведены на рис. 3 и 4.

Плотность пород, плотность их твердой фазы и эффективная пористость определяли методом гидростатического взвешивания образцов [Бурмистров и др., 2009]. Температура Дебая рассчитывалась по следующей формуле:

$$TD = 251,3 \cdot [d/M_a]^{-1/3} V_m, V_m = \\ = 1/3[(2 V_p \cdot V_s)/(2 V_p^3 + V_s^3)]^{-1/3}.$$

Для определения  $TD_T$  (твердой фазы пород) использован следующий вариант этой формулы:

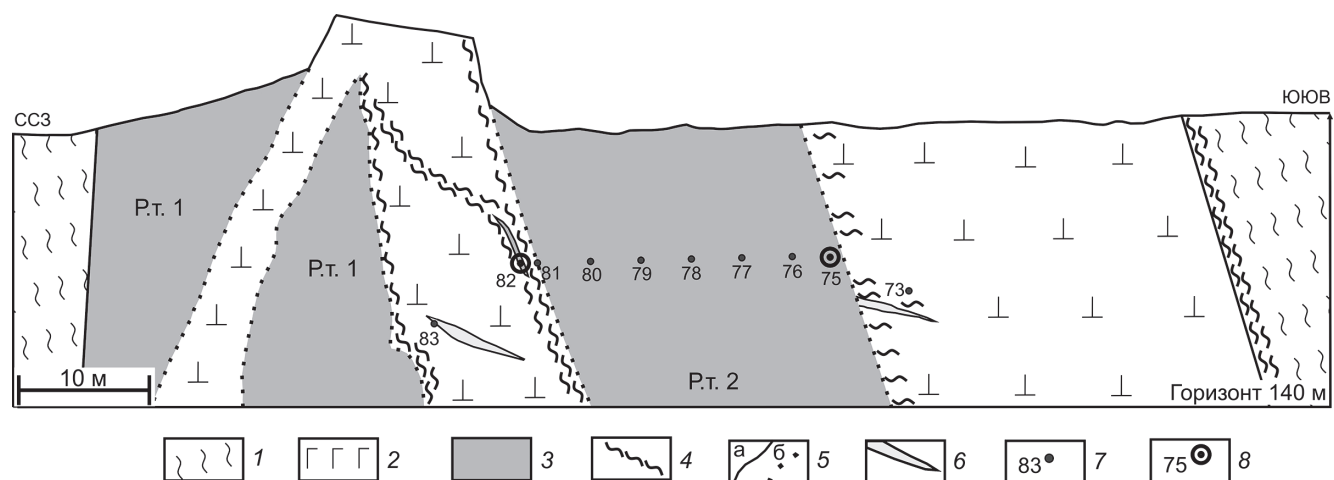


Рис. 3. Профиль через рудное тело 2 и ранние габбро-порфириды: 1 — метасоматиты; 2 — габбро-порфириды (предрудные); 3 — колчеданно-полиметаллические руды; 4 — зоны расщеливания; 5 — геологические границы (а — четкие, б — размытые, «рваные», с постепенными переходами); 6 — кварц-карбонат-сульфидные и гипсовые жилы; 7, 8 — точки отбора проб: 8 — пробы, участвовавшие в эксперименте



Рис. 4. Профиль через рудное тело 1 и поздние габбро-порфириды: 1 — метасоматиты; 2 — дациты; 3 — габбро-порфириды (предрудные); 4 — габбро-порфириды (позднерудные); 5 — колчеданно-полиметаллические руды; 6 — зоны расщеливания; 7 — кварц-карбонат-сульфидные жилы; 8 — точки отбора проб; 9 — пробы, участвовавшие в эксперименте

$$TD_T = 251,3 \cdot [d_T/M_a]^{-1/3} V_m, V_m = \\ = 1/3[(2 V_p \cdot V_s)/(2 V_p^3 + V_s^3)]^{-1/3},$$

где  $V_m$  — скорость ультразвука в образцах, установленная по данным замеров скорости продольной ( $V_p$ ) и поперечной ( $V_s$ ) волн;  $M_a$  — средняя масса атомов в петрогенных оксидах образцов и рассчитанных по данным химических анализов, проведенных в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН [Ярцев, 2018].

Удельная теплоемкость определялась стандартным калориметрическим способом, а удельная энтропия ( $S$ , Дж/кг·К) приближенно рассчитывалась по следующей формуле (с учетом близости значений изохорной ( $C_v$ ) и изобарной ( $C_p$ ) удельной теплоемкости для твердых тел, т. е.  $C_v \approx C_p$ ) [Жариков, 2005]:

$$S = \int C_p/T dT \approx \int C_v/T dT = C_v [\ln(295) - \ln(1)].$$

Удельная энтропия ( $S_{хим}$ ) рассчитывалась по химическому составу пород стандартным методом: сначала по данным химических анализов определяли молярную энтропию образцов. По ее значениям и количеству молей в 1 кг породы рассчитывалась удельная энтропия ( $S_{хим}$ , Дж/кг·К).

По полученным значениям  $S$  и  $S_{хим}$  рассчитывали соответствующие им значения удельных энтропий для единичного объема (1 см<sup>3</sup>) твердой фазы образцов по следующим формулам:

$$s \text{ (Дж/см}^3 \cdot \text{К)} = S/V, s_{хим} \text{ (Дж/см}^3 \cdot \text{К)} = \\ = S_{хим}/V; V(\text{см}^3) = 1000(\text{г})/d_T \text{ (г/см}^3),$$

где  $V$  — объем 1 кг твердой фазы породы.

Для оценки плотности упаковки атомов в твердой фазе пород выполняли расчет условного среднего объема межатомных связей ( $v$ , Å). Для этого определяли объем твердой фазы в единичном объеме пород (1 см<sup>3</sup> = 10<sup>24</sup> Å) по формуле:  $1 - P_{эф}/100$ , а также количество атомов в этом объеме ( $M_a$ ), равное частному от деления плотности твердой фазы на среднюю массу ее атомов, которая численно в 1,66 раза больше их атомного числа (1,66 · 10<sup>-24</sup> г). В итоге была получена следующая расчетная формула:

$$v = (1 - P_{эф}/100) \cdot 1,66 \cdot M_a/d_T.$$

На основе статистического сравнения химического состава сильно- и среднеизмененных (1 и 2 группы), слабо и практически не измененных пород (3 группа) (табл. 1) была получена следующая формула для расчета петрохимического показателя (Пп) образцов по значениям содержания в них петрогенных оксидов (масс.%):

$$Пп = \ln\{(Na_2O \cdot K_2O \cdot CaO \cdot SiO_2) / (MgO \cdot FeO_{общ.})\}.$$

В числитель этого показателя вошли значения содержаний петрогенных оксидов, характеризующихся преимущественно устойчивым и относительно высоким выносом в процессах изменения пород, а в знаменатель — привносом. Значения этого пока-

зателя сглажены посредством логарифмирования. С уменьшением его значений отмечено увеличение привноса в породы железа и магния и/или уменьшение выноса из них кальция и кремнезема, в меньшей степени щелочей.

Кварц-серицитовые изменения могли накладываться на зоны пропилитизации (или наоборот), но при этом процессы привноса и выноса соответствующих компонентов могли приобретать достаточно сложный (сопряженный) характер и отчасти нивелировать друг друга, что типично для вторичных процессов в палеовулканических областях [Набоко, 1963; Zharikov et al., 2007]. Отметим, что оценка степени изменений по этому показателю не полная еще и потому, что в процессе изменений мог иметь место изохимический метаморфизм с образованием гидросиликатов при воздействии на породы горячих водных флюидов, нередко сопровождавших тектонические деформации. Для оценки интенсивности проявления этих процессов можно использовать и термодинамические параметры — температуру Дебая и удельную энтропию пород [Бурмистров и др., 2009, 2010; Жариков, 2005].

#### Результаты исследований и их обсуждение.

В табл. 2 приведены средние значения изученных параметров, которые соответствуют двум группам «околорудных» габброидов: первая представлена простудными неизмененными или слабоизмененными габброидами (обр. 221-307), вторая включает сильно- и среднеизмененные габброиды, возраст которых близок к возрасту образования самих рудных тел (обр. 82, 75, 130-301). Первые могли подвергнуться поздним изменениям, как, например, обр. 221, приуроченный к рассланцованному контакту между рудным телом и поздними габброидами. Вторая группа включает вкрапленные колчеданные руды (обр. 75) и пирит-кварц-серицитовые метасоматиты (обр. 82 и 130). Для двух последних образцов — мелких по сравнению с остальными — в табл. 2 приведены усредненные значения параметров: объединение данных для них потребовалось для получения приемлемой точности измерений.

Состав и степень изменений пород устанавливали по результатам химических анализов образцов (табл. 1) и петрографического изучения шлифов и подробно охарактеризованы в работе [Ярцев, 2018]. По значениям Пп видно (табл. 2), что интенсивность изменений проявлялась в габброидах второй группы очень неравномерно. Причиной этого может быть разная степень их тектонической нарушенности и как следствие — различная проницаемость, а также расстояние от контакта с рудным телом.

Как видно из данных табл. 2, слабоизмененные породы имеют в среднем более низкую плотность и плотность твердой фазы, удельную теплоемкость, удельную энтропию твердой фазы, рассчитанную как по данным химического состава, так и по петрофизическим параметрам. Значения удельной энтропии, рассчитанные по петрофизическим данным

Таблица 1

Среднее содержание (масс.%) петрогенных оксидов и значения их привноса или выноса в трех группах в разной степени измененных вмещающих субвулканических телах и дайках позднедевонских габброидов Джусинского месторождения

Параметр ( <i>n</i> )	<i>L</i> , м	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO <sub>общ.</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Сильноизмененные											
<i>C</i> <sub>ср</sub> (3)	0,1–0,2	2,87	11,39	15,58	38,12	0,44	0,67	2,28	0,29	17,66	0,36
Слабо- и среднеизмененные											
<i>C</i> <sub>ср</sub> (3)	0,1–0,5	3,49	7,39	15,05	43,66	0,97	4,29	2,48	0,24	14,90	0,37
Неизмененные и слабоизмененные											
<i>C</i> <sub>ср</sub> (16)	0,1–240	3,71	5,32	15,03	48,44	1,43	6,70	2,59	0,19	11,65	0,59
Δ <i>C</i> <sub>1</sub> , %	–	–0,84	6,07	0,56	–10,32	–0,99	–6,03	–0,30	0,09	6,01	–0,23
Δ <i>C</i> <sub>2</sub> , %	–	–0,22	2,07	0,02	–4,79	–0,46	–2,41	–0,11	0,05	3,25	–0,19

Примечания. В скобках *n* — число образцов; Δ*C*<sub>1</sub> и Δ*C*<sub>2</sub> — привнос (положительные значения) и вынос (отрицательные) компонентов в измененных породах (1-я и 2-я группы, соответственно) по сравнению с неизмененными (3-я группа); *L* — расстояние от места отбора проб до контакта с рудным телом. Исходные данные, использованные для усреднения, опубликованы в [Ярцев, 2018] и доступны по запросу у первого автора статьи.

Таблица 2

Петрофизические и физико-химические параметры образцов субвулканических тел и даек позднедевонских габброидов Джусинского месторождения

Номер образца	Плотность, <i>d</i> , г/см <sup>3</sup>	Плотность ТФх <sub>д</sub> , г/см <sup>3</sup>	Эффективная пористость, <i>P</i> <sub>эф</sub> , %	Температура Дебая, <i>T</i> <sub>Д</sub> , К	Температура Дебая ТФ, <i>T</i> <sub>Д</sub> , К	Удельная теплоемкость, <i>C</i> , Дж/кг·К	Средняя масса атома, <i>M</i> <sub>ат(хим)</sub>	Петрохимический показатель, <i>Пп</i>	Удельная энтропия, <i>S</i> <sub>хим</sub> , Дж/кг·К	Удельная энтропия <i>S</i> , Дж/кг·К	Удельная энтропия <i>s</i> <sub>хим</sub> , Дж/см <sup>3</sup> ·К	Удельная энтропия <i>s</i> , Дж/см <sup>3</sup> ·К	Средний объем межатоминых связей, <i>A</i> <sup>3</sup>
Слабо- и неизмененные													
221	2,78	2,84	2,3	420	434	1017	24	2,6	4097	5794	12	16	14
305	2,37	2,57	7,8	308	308	956	24	3,3	4103	5446	11	14	14
307	2,65	2,75	3,8	378	383	973	26	2,5	4180	5547	11	15	15
310	2,77	2,85	2,7	456	480	1049	25	4,1	4189	5981	12	17	14
403	2,83	2,86	0,9	406	404	948	23	2,6	4357	5406	12	15	13
324	2,80	2,90	3,3	463	460	874	25	4,1	4165	4984	12	14	14
ср.	2,70	2,80	3	405	411	970	25	3,2	4182	5527	12	15	14
Сильно- и среднеизмененные													
301	2,73	2,83	3,6	486	531	1122	23	0,7	4172	6398	12	18	13
322	2,76	2,85	3,2	520	548	983	24	0,9	4327	5602	12	16	14
401	2,74	2,80	2,4	375	371	929	21	0,4	4918	5295	14	15	12
75	3,07	3,11	1,5	339	365	680	27	–2,9	4176	3878	13	12	14
82/130*	2,99	3,00	1,5	298	313	1515	22	–0,6	4325	8636	13	26	12
среднее	2,86	2,92	2,4	404	426	1046	23	–0,3	4384	5962	13	17	13

Примечание. \*Среднее из двух образцов; ТФ — значения параметров для твердой фазы образцов, хим — значения параметров, рассчитанные по данным химических анализов образцов

(*s*) выше по сравнению с *s*<sub>хим</sub> (за исключением обр. № 75). Это, вероятно, объясняется тем, что величина *s* зависит не только от их состава, но и от наложенных структурных изменений пород и минералов, к которым относятся нарушение структурного каркаса породы (микротрещиноватость) при рассланцевании

пород, а также структурно-минеральные изменения при замещении пироксена амфиболом и хлоритом, а полевого шпата — серицитом, что установлено при изучении шлифов [Ярцев, 2018]. Повышенное содержание сульфидов меди, цинка и марганца по данным химических анализов и изучения шлифов [Ярцев,

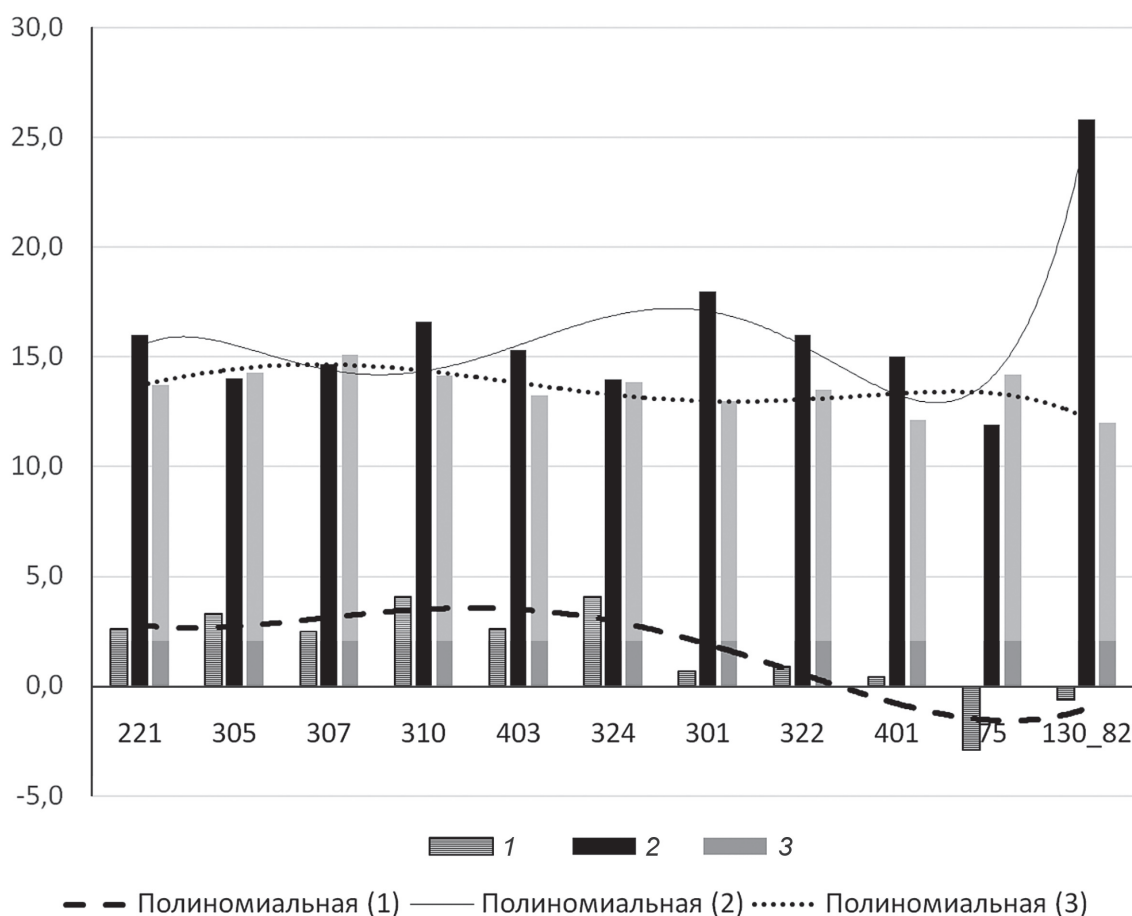


Рис. 5. Гистограммы значений петрохимического показателя, удельной энтропии и среднего объема межатомных связей образцов поздних (№ 221–324) и ранних (№ 301–130\_82) габброидов Джусинского месторождения. Показаны линии тренда, полученные способом сглаживания исходных значений параметров полиномиальной кривой; на горизонтальной оси — номера образцов, вертикальная ось соответствует шкале значений параметров: 1 — петрохимический показатель; 2 —  $S$ , Дж/см<sup>3</sup>·К; 3 — средний объем межатомных связей, Å<sup>3</sup>

2018] установлено в образце № 75 (Cu 584 ppm, Zn 2886 ppm, Mn 4145 ppm), в образцах № 82 и № 130 — их заметно меньше (Cu 186 и 100 ppm, Zn 726 и 562 ppm соответственно). Эти образцы отобраны из ранних рассланцованных и сильноизмененных габброидов вблизи их контакта (0,1–0,2 м) с рудным телом; на высокую степень их изменения указывают также отрицательные значения Пп. Разброс значений удельной энтропии ( $s$ , Дж/см<sup>3</sup>·К) здесь максимален. Максимум ее соответствует образцам № 82 и 130, которые представлены тонкорассланцованными сульфидно-кварц-серицитовыми метасоматитами, а минимум — образцу № 75 (бедная колчеданная руда), характеризующемуся максимальной среди всех других образцов плотностью. Повышенное содержание сульфидов привело к снижению удельной теплоемкости и удельной энтропии. Отсюда следует вывод, что процессы преобразования силикатной матрицы пород и переотложение сульфидов из первичных руд метаморфогенными (а ранее — поствулканическими) флюидами приводили к разнонаправленному изменению удельной энтропии. Для наиболее измененных образцов № 75, 82, 130 и 401 отмечены также пониженные значения температуры Дебая, прямо зависящей от степени однородности строе-

ния пород и плотности упаковки кристаллической решетки слагающих их минералов.

Условный объем межатомных связей, как и эффективная пористость во второй группе образцов, в среднем снижается (табл. 2). При образовании гидросиликатов обычно они увеличиваются за счет вхождения в состав минералов гидроксильной группы. Однако процессы перекристаллизации пород и залечивания мелких пор, в том числе высокоплотными сульфидами (наблюдается снижение эффективной пористости), а также интенсивный динамометаморфизм, сопровождавшийся пластическими тектоническими деформациями, вероятно, имели более существенное влияние на изменение микро- и наноструктуры порообразующего субстрата.

Общие закономерности изменения удельной энтропии, среднего объема межатомных связей и петрохимического показателя отражаются в трендах их изменения, показанных на рис. 5: с ростом степени изменения пород (на рисунке — слева направо) происходит увеличение удельной энтропии и уменьшение петрохимического показателя и среднего объема межатомных связей. В этом же направлении отмечен и заметный рост дисперсии значений этих параметров.



В теоретическом отношении факторы изменения энтропии для необратимых процессов проанализированы В.А. Жариковым на основе принципов Л. Онзагера [Жариков, 2005]. В результате установлено, что скорость изменения удельной энтропии в единичном объеме пород  $[dS/(V \cdot dt)]$  в целом соответствует алгебраической сумме произведений потоков энергии и вещества: тепловой ( $dQ/dt$ ), механической, в результате деформации ( $dV/dt$ ), химической — скорости изменений масс компонентов ( $dm_a/dt$ ) на величины вызывающих их факторов: объемных градиентов функций  $[\text{grad}(f_{x,y,z})]$ : изменения температуры ( $f_{x,y,z} = 1/T$ ), давления ( $f_{x,y,z} = p/T$ ) (тектонических напряжений), суммарного изменения химических потенциалов компонентов пород и насыщавших их флюидов ( $f_{x,y,z} = \sum ka \mu_a/T$ ) соответственно. Объемные градиенты этих функций определяются как суммы их частных производных по осям  $x, y, z$ . В итоге скорость изменения удельной энтропии для единичного объема пород при необратимых физических и геохимических процессах описывается следующим уравнением [Жариков, 2005]:

$$(dS/V) dt = \text{grad}(1/T)_{x,y,z} \cdot dQ/dt + \text{grad}(p/T)_{x,y,z} \times \\ \times dV/dt - \text{grad}[\sum ka (\mu_a/T)]_{x,y,z} \cdot dma/dt.$$

Отметим, что в ходе геологической истории процессы образования и преобразования пород и руд могли проходить как одновременно, так и последовательно [Vikentyev et al., 2016]. Можно сделать допущение, что изменение удельной энтропии в ходе развития отдельно взятого процесса во всем объеме пород месторождения происходило примерно синхронно. В то же время скорость развития каждого из них в каждом единичном объеме пород была разной. Поэтому можно предполагать, что относительно большее изменение удельной энтропии в некоторых образцах, вероятно, соответствовало и относительно большей скорости изменения удельной энтропии на этом участке либо большему числу процессов, приведших к изменению пород (при условии, что их воздействие на породы было однонаправленным). Три компонента этого уравнения могли быть связаны между собой: рост температуры и активности различных химических компонентов приводили к изменению всестороннего давления и объема пород, а объем пород мог также меняться вследствие преобразований их химического состава. Все это приводило и к их механическим деформациям.

Движущей силой этих процессов, вероятно, служили как поствулканические процессы гидротермального метаморфизма, так и деформации (и вызывающие их тектонические напряжения), которые, судя по более высокой степени изменений пород раннего комплекса, проявлялись наиболее интенсивно до внедрения позднего комплекса тел габброидов. Привнос компонентов в породы приводил к снижению их удельной энтропии в одном месте, а вынос — к ее росту в другом. Хрупкие

деформации также способствовали росту удельной энтропии пород. В настоящее время можно определить только остаточное (необратимое) изменение их удельной энтропии. А для палеообстановки мы можем реконструировать эти процессы лишь весьма приблизительно.

Процессы поствулканического изменения состава пород и их динамометаморфизм, по-видимому, проявлялись на Урале в течение достаточно продолжительного геологического времени в позднем палеозое, а локально — и позднее. Наиболее широко на средних и глубоких горизонтах получили развитие процессы пропилитизации и кварц-серицитовых изменений [Набоко, 1963; Zharikov et al., 2007]. В градиентном силовом поле зоны смятия при интенсивном расщеплении пород в ходе перераспределения жидких фаз в трещинно-поровом пространстве пород шло переотложение сульфидов [Викентьев, 2004; Ярцев, 2018; Vikentyev et al., 2016]. Абсолютная степень изменений изученных пород, скорее всего, более значительна, чем относительная, установленная при сравнении свойств ранних и поздних габброидов позднего девона. Кроме того, различия петрофизических свойств постепенно нивелируются с увеличением возраста пород в процессе региональных метаморфических преобразований [Бурмистров и др., 2009].

**Закключение.** Отметим, что в указанной работе показана принципиальная возможность использования рассмотренных методов. Для получения статистически более обоснованных результатов необходим отбор и изучение более представительной выборки образцов, что определяется сильной изменчивостью их состава и свойств даже на небольшом расстоянии. В то же время исследования показали, что петрофизические методы позволяют проводить экспрессную количественную оценку интенсивности проявления этих процессов после того, как проведено сопоставление петрофизических данных с геохимическими, петрографическими, структурными и, возможно, также микроструктурными данными по эталонным образцам [Бурмистров и др., 2009].

Исследования позволили подтвердить фундаментальную связь петрофизических и термодинамических параметров пород с рассмотренными геологическими процессами и связанными с ними геохимическими и тектоническими преобразованиями пород и продемонстрировать принципиальную возможность количественной оценки интенсивности их развития в определенном объеме геологической среды. Как показали и наши предшествующие исследования [Бурмистров и др., 2010; Бурмистров, 2010], эту методику можно использовать для специализированного картирования и сравнения различных рудных объектов.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00849) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 13.1902.21.0018).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бурмистров А.А. Физико-химический анализ петрофизических данных (на примере золоторудного месторождения Светлинское, Ю. Урал) // Мат-лы 11-й междунаrod. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 40–43.

Бурмистров А.А., Алешин А.П., Полуэктоv В.В. Взаимосвязь петрофизических и физико-химических параметров трахидацитов Тулукуевского и Октябрьского урановых месторождений // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Мат-лы 11-й междунар. конф. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 60–62.

Бурмистров А.А., Старостин В.И., Дергачев А.Л., Петров В.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых. 2-е изд., испр. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009. 408 с.

Викентьев И.В. Метаморфогенные геохимические ореолы Тишинского месторождения // Докл. РАН. 1995. Т. 343, № 6. С. 806–809.

Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный мир, 2004. 344 с.

Жариков В.А. Основы физической геохимии: Учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 654 с.

Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 170 с.

Петрофизика: Справочник. В 3-х кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391с.

Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1989. 250 с.

Структурно-минералогические критерии метаморфогенного оруденения (на примере колчеданных месторождений) / Под ред. Н.Л. Добрецова. Новосибирск: Наука, 1987. 168 с.

Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. IV. Применения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела. Ч. Б. М.: Мир, 1970. 440 с.

Ярцев Е.И. Колчеданно-полиметаллическое оруденение в метаморфизованных вулканогенных толщах Южного Урала (на примере Джусинского месторождения). Казань: Бук, 2018. 170 с.

Ярцев Е.И., Бурмистров А.А., Викентьев И.В. Закономерности локализации и прогноз оруденения на Джусинском колчеданно-полиметаллическом месторождении (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 2. С. 48–58. DOI: 10.3103/S0145875218030146

Ярцев Е.И., Викентьев И.В., Еремин Н.И. Изотопный состав и особенности геохимии руд Джусинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 78–83.

Ярцев Е.И., Викентьев И.В., Прокофьев В.Ю. Минералого-геохимические свидетельства контактового преобразования руд Джусинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. № 1. С. 39–44. DOI: 10.3103/S0145875217020090

Starostin V.I., Vikent'yev I.V., Sakiya D.R. Conditions of formation and transformation of massive sulfide deposits in the Kedrovka-Butachikha zone of the Rudnyy Altay // Intern. Geol. Rev. 1989. Vol. 31(3). P. 297–305. DOI: 10.1080/00206818909465882

Vikentyev I.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Molos-hag V.P. Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. Ore geology // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 85. P. 30–63. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.032

Zharikov V.A., Pertsev N.N., Rusinov V.L. et al. Metasomatism and metasomatic rocks // Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web Version 01.02.07. British Geol. Surv. Nottingham, UK, 2007.

Поступила в редакцию 10.10.2020

Поступила после доработки 30.06.2021

Принята к публикации 13.12.2021