

дувы мощности или положение рудных столбов. Шаг между структурами в широтном направлении составляет 25–50, редко до 200 м. Они создают «блоковую» картину размещения оруденения, хотя можно говорить об отсутствии существенных перемещений по ним. Вместе с тем, указанное обстоятельство осложняет увязку рудных тел даже по данным опережающей эксплуатационной разведки. Возможно, что в пострудное время по этим структурам также происходили неотектонические перемещения, однако их значение еще предстоит уточнить.

Северо-восточные структуры ограничивают относительно крупные блоковые постройки и в ряде случаев вмещают оруденение. Структуры данной ориентировки почти совпадают с направлением разведочных профилей, в связи с чем определение их положения, а также оценка роли в размещении полезного ископаемого на ранних стадиях работ были невозможны. Максимум тектонической неоднородности тяготеет к центральной части месторождения (главный таксон в системе рудных зон). На флангах месторождения тектоническое строение упрощается, где начинают преобладать линейные формы рудных тел. Однако отработкой фланги еще не затронуты, что не позволяет дать их подробное описание.

Представляется, что эти факторы в совокупности, а также наличие оруденения в структурах северо-восточной ориентировки, повлияли на то обстоятельство, что по результатам сопоставления за пределами утвержденных границ рудных зон оказалось значительное количество руды. Вместе с тем, содержание золота в этих запасах оказалось существенно ниже (почти в 2,5 раза), чем в рудах в пределах контура; количество «законтурного» золота составило только 35 % от утвержденных запасов.

#### Выводы

1. Результаты эксплуатации и отработки подтвердили основные особенности геологического строения месторождения Павлик и условия локализации золотого оруденения на уровне рудных зон. Анализ данных эксплуатационной разведки выявил сложную картину размещения рудных тел в пределах зон и на их периферии.

2. Основными рудоконтролирующими структурами в центральной части месторождения являются зоны трещиноватости, имеющие субширотную и северо-западную ориентировку с азимутами простирания 90° и 120°–140°. Данные структуры определяют локализацию около 75 % запасов руды. Субмеридиональные структуры часто играют роль ограничителей, определяя «блоковый» характер размещения оруденения; они влияют также на положение рудных столбов в пределах месторождения. Северо-восточные структу-

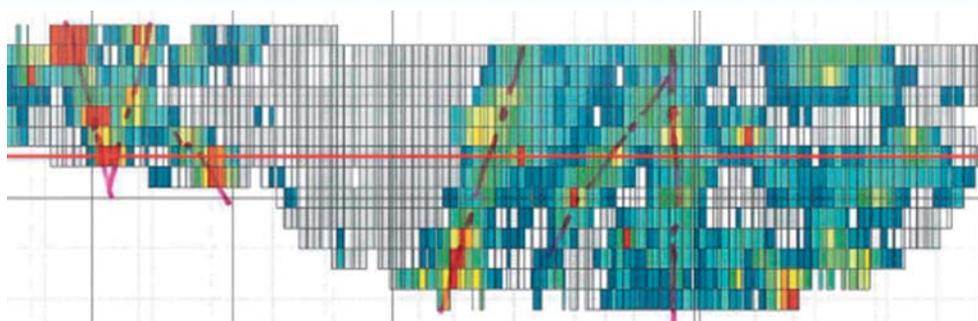


Рис. 6. Распределение содержаний золота в разрезе по блочной модели (разрез I–I)

ры служат ограничителями более крупных структурно-морфологических элементов, оценка которых выходит за границы статьи.

3. Важным инструментом дешифрирования особенностей геологического строения объекта на основе обобщения и анализа большого объема геологоразведочной информации, полученной в процессе эксплуатации, является блочное моделирование. Его результаты могут использоваться также для оперативного планирования добычных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григоров, С.А. Локализация таксонов геохимического поля ореолообразующей и рудообразующей системы в масштабах 1:1 000 000–1:2000 (структурная геохимия) / С.А. Григоров. — М.: ИМГРЭ, 2018. — 169 с.
2. Каждан, А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. — М.: Недра, 1974. — 272 с.
3. Рекомендации к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическому обоснованию кондиций и подсчету запасов твердых полезных ископаемых с использованием блочного моделирования на месторождениях различного морфологического типа. — М.: ГКЗ, 2016.

© Григоров С.А., Кушнарёв П.П., 2019

Григоров Сергей Александрович // grigorov.sergey@pavlik-gold.ru  
Кушнарёв Павел Петрович // kushnaryov2006@yandex.ru

УДК 553.08+553.26

Кудрин К.Ю. (ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск)

#### БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУДАХ ПРОЯВЛЕНИЯ «ЗАПАДНОЕ» (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

*Благородные металлы — золото и серебро — представлены преимущественно теллуридами: гесситом, штюцитом, вольфскитом, матильдитом, цервеллеитом, петцитом и сальванитом; реже — самородным золотом. Вмещающей минеральной матрицей чаще всего являются сульфиды: сфалерит, пирротин, халькопирит, пирит; реже — галенит. Формирование теллуридов и самородных элементов протекало в диапазоне температур 131–281°С. Ключевые слова: Приполярный Урал, медно-цинковые руды, теллуриды, хлориты.*

*Precious metals — gold and silver — tellurides are mainly: hessite, stutzite, volynskite, matildite, cervelleite, petzite and sylvanite; rarely native gold. The host mineral matrix is most often sulfides: sphalerite, pyrrhotite, chalcopyrite, pyrite; rarely — galena. Formation of tellurides and native elements occurred in the temperature range 131–281°С. Keywords: Subpolar Urals, copper-zinc ores, tellurides, chlorites.*

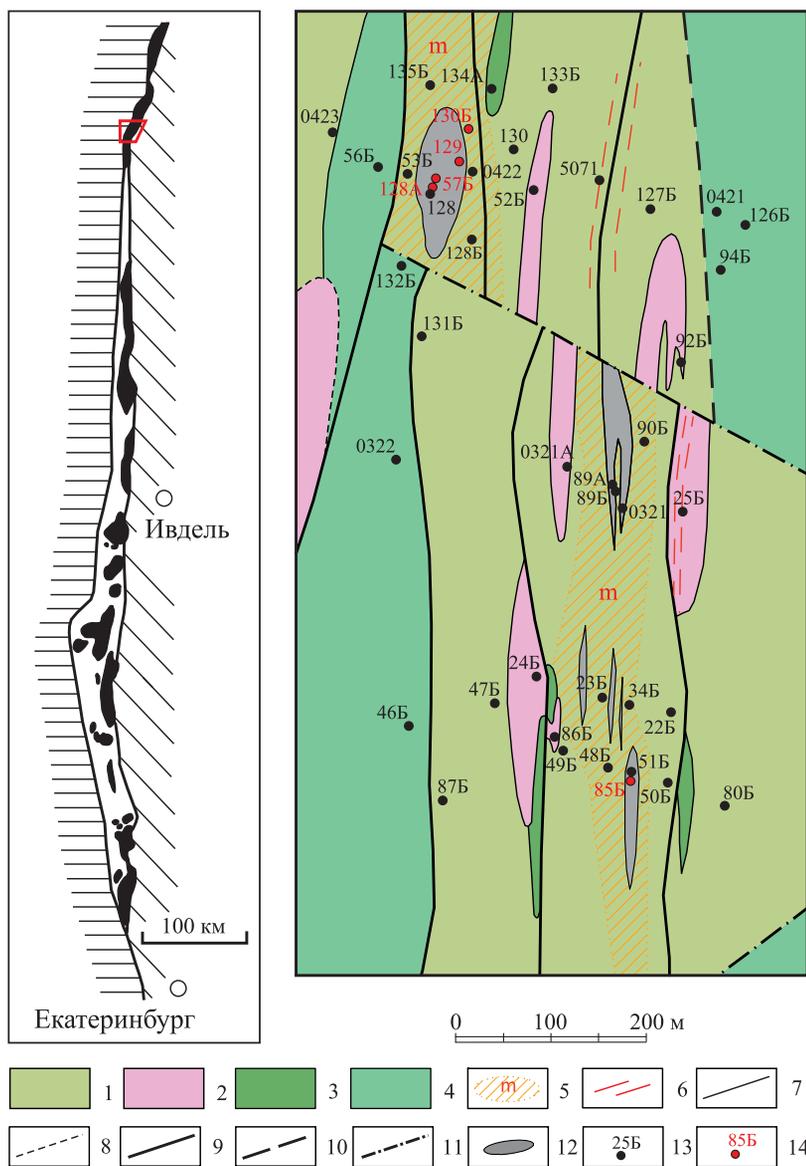
### Введение

Проявление «Западное» выявлено при проведении поисковых работ на железные руды в 1988 г. в юго-восточной экзоконтактовой зоне Хорасюрского массива (рис. 1) на восточном склоне Приполярного Урала (Комарицкий С.И. «Подготовка геофизической основы для поисков (опережающие работы) железных руд скарново-магнетитовой формации на Усыньин-

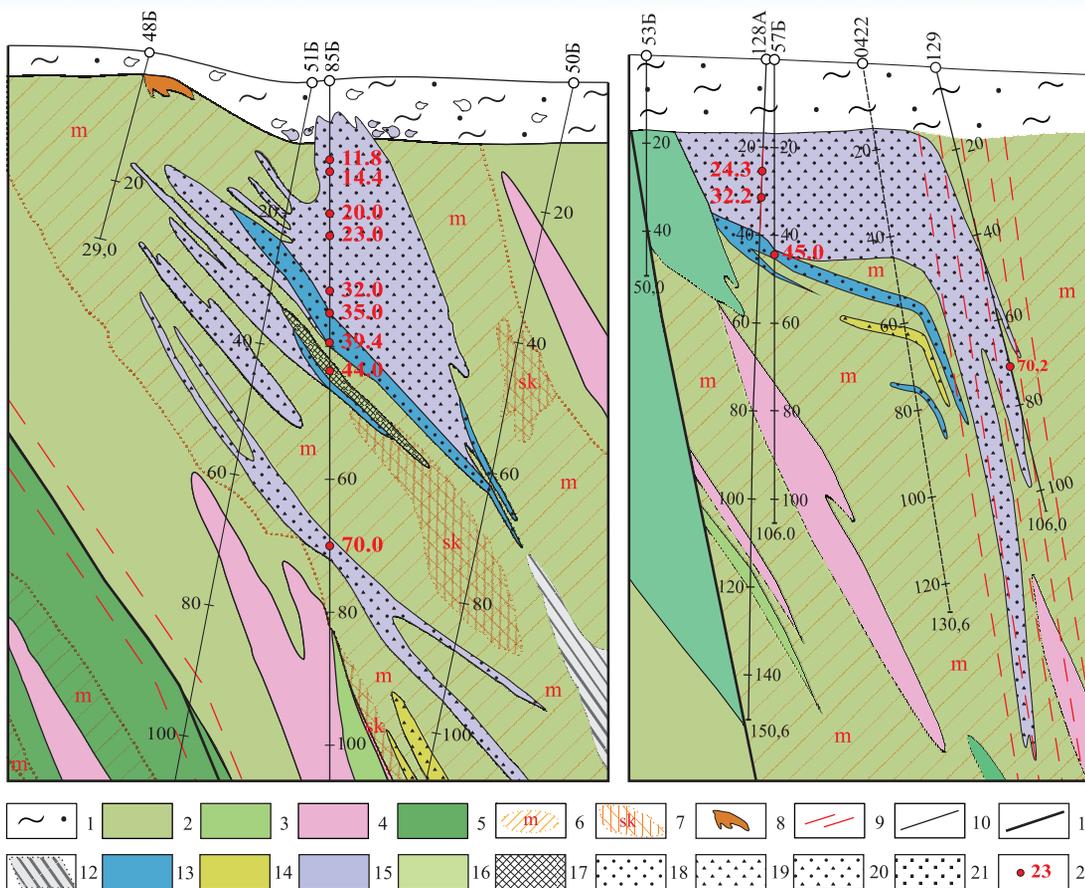
ской площади в 1988–1990 гг.», ОАО «Сосьвапромгеология», 2001 г.). Пробирный анализ медно-цинковых руд показал постоянное присутствие в них значительной примеси золота (до 3,19 г/т, среднее — 0,36–0,46 г/т) и серебра (до 19,95 г/т, среднее — 4,39 г/т). Подсчитанные авторские ресурсы (сумма кат. P<sub>2</sub> и P<sub>3</sub>) составили: золото — 8,9 т, серебро — 361,1 т.

В 2006–2009 гг. на Западной площади выполнены прогнозно-поисковые работы на медь (ОАО «Уральская геологическая съемочная экспедиция», Екатеринбург, Батурин С.Ю.): выявлено две сложно построенные рудные залежи («Западная» и «Новая») (рис. 1); авторские ресурсы золота кат. P<sub>1</sub>+P<sub>2</sub> составили 26 т, ресурсы серебра не оценивались. Содержание золота достигает 24,1 г/т (среднее в рудной залежи «Западная» 0,53 г/т, в рудной залежи «Новая» — 0,73 г/т); содержание серебра — до 69,6 г/т.

Минералого-геохимические исследования медно-цинковых руд, выполненные в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс), показали, что особенностью пирротина, пирита, халькопирита и сфалерита проявления «Западное» является повышенное содержание Ag и промышленно значимое содержание Au, а также появление серебросодержащего сфалерита. Выделены сфалерит-серебро-галенитовая и халькопирит-золото-серебро-теллуридная ассоциации, «...очевидно, представленные тонкой рассеянной невидимой минерализацией в халькопирите и сфалерите». По результатам этих исследований проявление «Западное» предположительно отнесено к золото-серебро-медно-цинковому сульфидному скарновому типу. Аналогами проявления медно-цинковых руд «Западное» предложены месторождения Тарньерское (медноколчеданное) и Сарбайское (скарновое) на Северном и Среднем Урале:



**Рис. 1. Схематическая геологическая карта Западной площади** (по С.Ю. Батурину, ОАО «УГСЭ», 2009 г.): 1 — тектоно-инъекционно-метасоматический рудовмещающий комплекс. Роговики по габброидам, дайковым породам и предположительно вулканогенно-осадочным образованиям шемурской свиты (O<sub>3</sub>-S<sub>3</sub>m), метасоматиты нерасчлененные; 2 — кварцевые диориты второй фазы северорудничного комплекса (qδS<sub>2</sub>); 3 — микрогаббродиориты второй фазы тагилотылымского комплекса (μδS<sub>1</sub>t<sub>2</sub>); 4 — амфиболовое и амфиболлизированное габбро второй фазы тагилотылымского комплекса (υS<sub>1</sub>t<sub>2</sub>); 5 — метасоматиты альбит-кварц-хлоритовые, кварц-эпидот-хлоритовые, эпидот-пренитовые нерасчлененные; 6 — бластокатаклазиты и бластомилониты; 7–8 — геологические границы: 7 — установленные; 8 — предполагаемые; 9–11 — тектонические нарушения: 9 — установленные; 10 — предполагаемые; 11 — по геофизическим данным; 12 — контуры рудных тел; 13 — разведочные скважины и их номера; 14 — разведочные скважины, по керну которых изучена благороднометалльная минерализация



**Рис. 2. Проявление «Западное». Рудное тело «Новое» (слева) и рудное тело «Западное» (справа).** Геологические разрезы (по С.Ю. Батурину, ОАО «УГСЭ», 2009 г.) и схема отбора образцов на минералогические исследования: 1 — рыхлые четвертичные отложения; 2 — дайки спессартитов; 3 — тектоно-инъекционно-метасоматический рудовмещающий комплекс; 4 — кварцевые диориты второй фазы северорудничного комплекса ( $q\delta S_2 S_2$ ); 5 — микроаббродиориты второй фазы тагилытлымского комплекса ( $\mu\delta S_1 t_2$ ); 6 — метасоматиты; 7 — скарны; 8 — железная шляпа; 9 — бластомилониты и бластокатаклазиты; 10 — геологические границы; 11 — тектонические нарушения; 12 — предполагаемые рудные тела; 13–16 — колчеданные руды: 13 —

медные ( $Cu > 0,7\%$ ); 14 — цинковые ( $Zn > 1\%$ ); 15 — медно-цинковые ( $Cu > 0,7\%$ ;  $Zn > 1\%$ ); 16 — серные ( $S > 35\%$ ); 17–21 — сорта руд (краспо соответствующему цвету): 17 — сплошные массивные; 18 — вкрапленные медные; 19 — вкрапленные цинковые; 20 — вкрапленные медно-цинковые; 21 — некондиционные ( $Cu < 0,7\%$ ;  $Zn < 1\%$ ;  $S < 35\%$ ); 22 — точки отбора материала на электронно-зондовые исследования

по комплексу имеющихся минералогических признаков оно признано промежуточным между ними [9].

Таким образом, анализ результатов ранее проведенных работ на проявлении «Западное» показывает, что остались открытыми вопросы: 1) о форме нахождения золота и серебра в медно-цинковых рудах; 2) о месте золота и серебра в рудообразующем процессе.

#### Методы исследования

Минералогические исследования проведены на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy 350 с детектором X-Max-80 (Oxford Instruments Analytical Ltd) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 0,3–0,5 нА, время при наборе спектров 10 с (г. Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, аналитик Карманов Н.С.). Изучено 14 проб, отобранных из керна скважин 85Б (рудная залежь «Новая») и 57Б, 128А, 129, 130Б (рудная залежь «Западная») (рис. 2). Всего выполнено 954 определения состава рудообразующих минералов, из них в 140 зафиксировано присутствие благородных металлов. Номенклатура благородно-металлических минералов определена в соответствии с [4]. Поскольку размер анализируемых зерен часто оказывался равен (или немного меньше) сечению пучка анализатора, результаты анализов включали и цифры,

относящиеся к вмещающей минеральной матрице. Поэтому при определении состава минерала вводилась корректировка на состав минерала-хозяина.

Кроме того, электронно-зондовым методом изучен компонентный состав более чем 100 зерен хлорита, для 78 установлена температура образования с использованием геотермометра по [10].

#### Минералогия золота и серебра руд проявления «Западное»

В составе руд проявления «Западное» установлено присутствие следующих минеральных видов, в которых благородные металлы играют основную роль: гессит, самородное золото, петцит, вольтинскит, штюцит, цервеллеит, матильдит, сильванит.

**Гессит** ( $Ag_2Te$ ) встречен во всех изученных образцах в виде мельчайших выделений, изредка достигая 10, крайне редко — 30 мкм. Минерал образует как самостоятельные зерна, так и участвует в сростаниях с другими теллуридами (реже с самородным золотом). Наиболее часто гессит наблюдается в сульфидах — сфалерите, халькопирите, пирите, пирротине и галените, реже — в силикатах (хлорите, биотите, плагиоклазе, эпидоте и гранате).

В связи с этим следует отметить некоторые особенности. Во-первых, гессит (часто совместно с другими теллуридами) образует цепочку линейно вытянутых зерен, что указывает на контроль их расположения

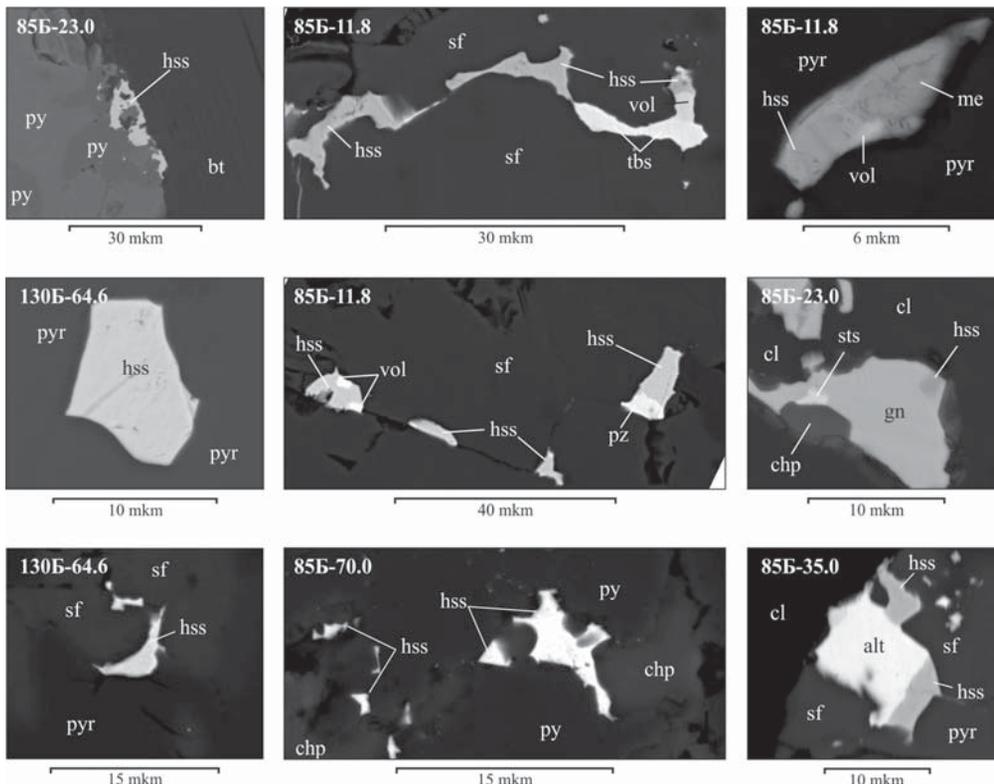
**Таблица 1**  
**Состав гессита (%) и характеристика вмещающей минеральной матрицы**

n	Состав				Вмещающая минеральная матрица	n	Состав				Вмещающая минеральная матрица
	Ag		Te				Ag		Te		
	min	max	min	max			min	max	min	max	
Скважина 85Б, глубина 11.8 м						Скважина 85Б, глубина 39.4 м					
18	54,51	63,52	36,48	42,44	Сфалерит, пирротин	5	57,86	64,34	35,66	42,14	Халькопирит, хлорит, пирит, гранат
Скважина 85Б, глубина 14.4 м						Скважина 85Б, глубина 44.0 м					
5	58,23	62,87	37,13	41,77	Сфалерит, плагиоклаз, хлорит	15	55,94	63,84	33,15	44,06	Хлорит
Скважина 85Б, глубина 20.0 м						Скважина 85Б, глубина 70.0 м					
10	61,70	63,33	36,67	38,30	Халькопирит, хлорит, пирит, сфалерит, эпидот	11	61,36	63,70	36,30	38,64	Пирит, сфалерит, хлорит
Скважина 85Б, глубина 23.0 м						Скважина 57Б, глубина 45.0 м					
5	59,27	62,44	37,56	40,73	Сфалерит, халькопирит, пирит	5	62,28	65,06	34,94	37,72	
Скважина 85Б, глубина 32.0 м						Скважина 128А, глубина 24.3 м					
1		62,84		37,16	Сфалерит	1		62,42		37,58	Халькопирит
Скважина 85Б, глубина 35.0 м						Скважина 130Б, глубина 64.6 м					
7	60,86	63,36	36,64	39,14	Сфалерит, алтаит, пирит, пирротин, хлорит, плагиоклаз	5	62,44	63,22	36,78	37,56	Сфалерит, пирротин, пирит

Примечание: n — количество анализов

микротрещинами или межзерновым пространством; эта особенность наблюдается исключительно при его размещении в сульфидах. Во-вторых, минерал (а так-

же его сростки с другими теллуридами) встречается в виде изометричных вкраплений, не обнаруживающих связи с трещиноватостью: в сульфидах (при этом, гессит имеет прямолинейные очертания) или в силикатах (минерал либо имеет волнистые и заливообразные границы, либо образует тончайшую сыпь зерен, характер ограничения которых оценить весьма затруднительно).



**Рис. 3. Формы выделения гессита в рудах проявления «Западное». В левом верхнем углу — номер скважины и глубина отбора пробы: hss — гессит; me — мелонит; pz — петцит; vol — вольтцит; tbs — теллуровисмутит; sts — штютцит; alt — алтаит; py — пирит; pyr — пирротин; sf — сфалерит; chp — халькопирит; gn — галенит; bt — биотит; cl — хлорит**

Гессит охотно образует сростания (вплоть до постепенных взаимопереходов) с другими теллуридами — вольтцитом, петцитом, теллуровисмутитом, мелонитом и алтаитом. Особенности состава гессита по результатам электронно-зондовых исследований приведены в табл. 1, формы выделения гессита в рудах проявления «Западное» представлены на рис. 3.

**Самородное золото** (рис. 4) зафиксировано в шести пробах, во всех минералогических типах руд залежей «Новая» и «Западная» по всему верти-

кальному размаху оруденения; образует мелкие выделения, изредка достигая 12 мкм. Встречается обычно самостоятельно, крайне редко наблюдаются сростки с петцитом и гесситом. Особенности распространения — образует выделения по микротрещинам или в межзерновом пространстве сульфидов (сфалерит, халькопирит, галенит); при развитии вторичных минералов (хлорит, эпидот, амфибол) — с волнистыми и заливообразными контактами. В составе (табл. 2) постоянно присутствует значительная примесь серебра

вплоть до появления электрума (только в медно-цинковых рудах). С глубиной пробы самородного золота возрастает.

**Петцит** ( $\text{Au}_3\text{AgTe}_2$ ) редок, встречен в материале трех проб, отобранных из керна скважины 85Б (залежь «Новая»), приурочен к сфалериту (как правило, к трещинам спайности), всегда присутствует совместно с другими благороднометалльными теллуридами (гесситом, цервеллеитом), образуя мелкие вкрапленники неправильной формы размером менее 5 мкм во всех минералогических типах руд. Особенности состава петцита по результатам электронно-зондовых исследований приведены в табл. 3, формы выделения петцита в рудах проявления «Западное» представлены на рис. 4.

**Волынскит** ( $\text{AgBiTe}_2$ ) отмечен в двух пробах вкрапленных медно-цинковых руд, отобранных из керна скважины 85Б (залежь «Новая»), приурочен к сфалериту и пирротину, обычно присутствует в виде сростков с гесситом, мелонитом и теллуровисмутитом, реже образует самостоятельные зерна, иногда имеющие гипидиоморфные субпризматические очертания, достигающая при этом 15 мкм. На контакте с хлоритом волынскит приобретает бесформенные комковатые очертания. Особенности состава волынскита по результатам электронно-зондовых исследований приведены в табл. 3, формы выделения волынскита в рудах проявления «Западное» представлены на рис. 4.

**Штютцит** ( $\text{Ag}_5\text{Te}_3$ ) отмечен в трех пробах вкрапленных медно-цинковых руд, отобранных из керна скважины 85Б (залежь «Новая»), приурочен к пирротину и галениту и к силикатным минералам (эпидоту и андрадиту), образует самостоятельные зерна изометричных очертаний размером до 7 мкм и имеет четкие резкие очертания. Особенности состава

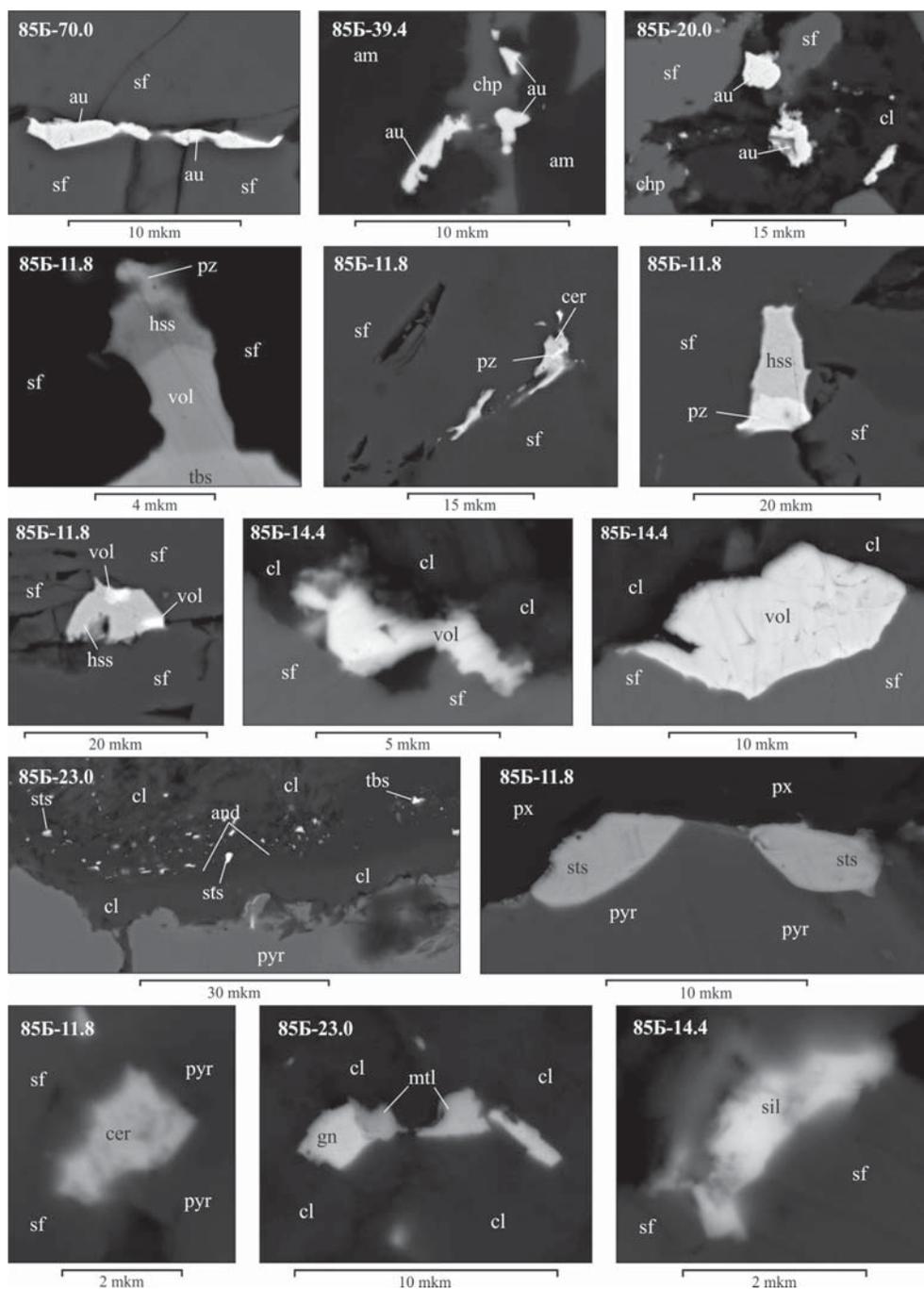


Рис. 4. Формы выделения самородного золота (верхний ряд), петцита (второй ряд), волынскита (третий ряд), штютцита (четвертый ряд), матильдита, цервеллеита и сильванита (нижний ряд) в рудах проявления «Западное»: au — самородное золото; am — амфибол; cer — цервеллеит; pl — плагиоклаз; and — андрадит; px — пироксен; mtd — матильдит; sil — сильванит; прочие сокращения и обозначения см. на рис. 3

штютцита по результатам электронно-зондовых исследований приведены в табл. 3, формы выделения штютцита в рудах проявления «Западное» представлены на рис. 3 и 4.

**Цервеллеит** ( $\text{Ag}_4\text{TeS}$ ), **матильдит** ( $\text{AgBiS}_2$ ) и **сильванит** ( $(\text{Au}, \text{Ag})_2\text{Te}_4$ ) в виде единичных зерен встречены в четырех пробах, отобранных из керна вкрапленных медно-цинковых руд в скважинах 85Б (залежь «Новая») и

**Таблица 2**

**Состав самородного золота (%) и характеристика вмещающей минеральной матрицы**

n	Состав				Вмещающая минеральная матрица	n	Состав				Вмещающая минеральная матрица
	Au		Ag				Au		Ag		
	min	max	min	max			min	max	min	max	
Скважина 85Б, глубина 20.0 м						Скважина 85Б, глубина 39.4 м					
4	61,62	65,94	34,06	38,38	Хлорит, плагиоклаз, сфалерит, халькопирит	7	67,77	76,23	23,77	32,23	Амфибол, хлорит, халькопирит, галенит, петцит, плагиоклаз
Скважина 85Б, глубина 35.0 м						Скважина 85Б, глубина 70.0 м					
1		70,74		15,48	Сфалерит	5	60,27	78,02	21,98	39,73	Сфалерит, гессит
Скважина 85Б, глубина 44.0 м						Скважина 128А, глубина 24.3 м					
2	69,51	69,87	30,13	30,49	Хлорит	2	47,54	48,93	51,07	52,46	Халькопирит

**Таблица 3**

**Состав (%) петцита, волинскита, штютцита, цервеллеита, сильванита, матильдита и характеристика вмещающей минеральной матрицы**

n	Состав										Вмещающая минеральная матрица
	Au		Ag		Bi		S		Te		
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
<b>Петцит</b>											
Скважина 85Б, глубина 11.8 м											
4	23,23	41,73	38,15	44,00					20,12	33,96	Сфалерит
Скважина 85Б, глубина 39.4 м											
1		34,57		41,88						23,55	Амфибол, хлорит
Скважина 85Б, глубина 44.0 м											
1		24,76		50,93						24,30	хлорит
<b>Волинскит</b>											
Скважина 85Б, глубина 11.8 м											
3			18,25	22,76	35,64	35,92			41,32	46,06	Сфалерит, гессит
Скважина 85Б, глубина 14.4 м											
3			18,51	18,71	35,74	36,65			44,64	45,86	Хлорит, сфалерит
<b>Штютцит</b>											
Скважина 85Б, глубина 11.8 м											
2			57,70	57,95					42,05	42,30	Пирротин
Скважина 85Б, глубина 20.0 м											
1				53,42						40,18	Эпидот
Скважина 85Б, глубина 23.0 м											
3			58,97	62,56					37,44	41,03	Андрадит, галенит
<b>Цервеллеит</b>											
Скважина 85Б, глубина 11.8 м											
3	2,87*	4,43*	55,63	59,86			2,14	4,88	31,99	39,16	Сфалерит, пирротин
Скважина 128А, глубина 24.3 м											
1				58,81				5,98		35,21	Сфалерит
<b>Сильванит</b>											
Скважина 85Б, глубина 14.4 м											
1		21,07		23,31						55,62	Сфалерит
<b>Матильдит</b>											
Скважина 85Б, глубина 23.0 м											
2			21,77	23,03	56,58	58,51	18,45	18,61			Галенит, хлорит

128А (залежь «Западная»). Обнаруживают тесную ассоциацию с пирротином, сфалеритом (цервеллеит и сильванит) и хлоритом (матильдит) (рис. 4). Составы минералов приведены в табл. 3.

### Результаты термометрии руд проявления «Западное»

Хлорит является сквозным минералом руд проявления «Западное»: при проведении аналитических исследований отмечен во всех изученных образцах. Результаты термометрии (табл. 4, рис. 5) показали, что хлориты образовывались в широком диапазоне температур (от 101 до 333 °С), при этом четко видно, что расположенные по возрастанию температуры данные образуют 6 дискретных групп, разделенных между собой температурным разрывом от 10 до 20 °С. Следует отметить, что с ростом (уменьшением) температуры меняется форма выделения хлоритов и парагенетическая ассоциация с другими минералами (в том числе сульфидами, теллуридами и самородными элементами).

*Первая температурная (высокотемпературная) ассоциация хлоритов (с1<sup>1</sup>)* выделена в интервале 290–333 °С. Хлориты этой ассоциации характеризуются волокнистым строением, активно развиваются по пороодообразующим амфиболом, пироксенам и оливину (рис. 6). Изредка встречаются в виде самостоятельных прожилков или представляют собой реликты среди низкотемпературного позднего хлорита. Наиболее характерен для образцов, отобранных из рудной залежи «Западная» в широком диапазоне глубин от поверхности. Изредка с хлоритами ассоциируют сульфиды (пирротин и галенит). Связь с теллуридами и самородными элементами не установлена.

*Следующая ассоциация хлоритов (с1<sup>2</sup>)* сформировалась в диапазоне температур 241–281 °С. Распространены преимущественно в рудах залежи «Новая» и характеризуются широким диапазоном форм проявления и глубин от поверхности. Наиболее распространены хлориты, которые активно замещают зерна плагиоклаза (рис. 6); в меньшей степени — хлориты, развивающиеся по эпидоту, биотиту и амфиболу; в резко подчиненном количестве — хлориты, замещающие гранат, хлорит и слагающие прожилки. Установлено, что с хлоритами (температура 256 °С), которые развиваются по более раннему хлориту, связано появление гессита, а с хлоритом (температура 273 °С), замещающим амфибол, ассоциирует самородное золото.

*Следующий температурный диапазон (204–223 °С) (с1<sup>3</sup>)* представлен относи-

тельно малочисленными зернами хлорита, установленными исключительно в рудной залежи «Новая» в широком диапазоне глубин от поверхности. Среди них преобладают хлориты, развитые по более ранним хлоритам (рис. 6); реже отмечаются хлориты, слагающие прожилки; в единичных случаях устанавливаются хлориты, развивающиеся по зернам амфибола, плагиоклаза, эпидота и биотита. С хлоритами описываемой ассоциации связано появление в рудах гессита (наблюдается в тесной связи с хлоритом (температура 217 °С), замещающим более ранний хлорит) и электрума (с хлоритом (температура 209 °С), развивающимся по плагиоклазу).

*Хлориты ассоциации (с1<sup>4</sup>)*, сформировавшейся в интервале температур 172–194 °С, установлены в обеих рудных залежах (при резком преобладании в залежи «Новая»). Ассоциация представлена всеми выделенными типами хлорита примерно в равной степени (рис. 6). С хлоритом (температура 182 °С) данного температурного интервала фиксируется появление алтаита (однако тип хлорита установить не удалось).

*Следующая ассоциация объединяет хлориты (с1<sup>5</sup>)*, образование которых ограничивается температурным диапазоном от 131 до 161 °С. Распространены преимущественно в рудной залежи «Новая». Ассоциация представлена в основном хлоритами, развивающимися по более ранним хлоритам (рис. 6); отмечаются единичные хлориты, замещающие эпидот, развитые по плагиоклазу и образующие прожилки. С хлоритами (температура 132 °С), развивающимися по эпидоту, фиксируется появление гессита; с хлоритами (температура 153–159 °С), замещающими более ранний хлорит, отмечается появление сульфозумоита.

*Последняя (низкотемпературная) ассоциация хлоритов (с1<sup>6</sup>)* сформировалась в интервале температур 101–120 °С. Пользуется распространением преимущественно в рудной залежи «Новая» и представлена, как

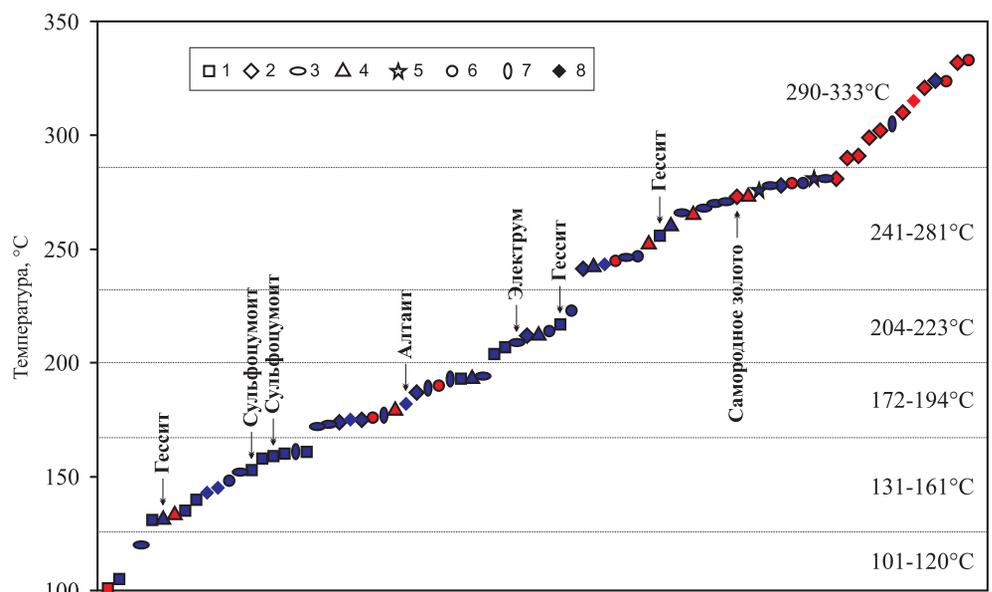


Рис. 5. Температурный диапазон [13] формирования хлоритов руд проявления «Западное», формы их проявления и связь с теллуридами и самородными элементами

**Таблица 4**  
**Химические составы и температуры образования хлоритов**

№ п/п	Образец	Точка	Температура, °С	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Хлориты первой температурной ассоциации (с <sup>1</sup> )											
1	128А-24,3	5-8	101	28,07	6,02	52,49	0,48	0,94			По хлориту
2	85Б-23,0	10-11	105	30,14	13,36	44,03			0,47		По хлориту
3	85Б-39,4	5-10	120	29,11	12,42	44,60	0,41		0,76		По плагиоклазу
Хлориты второй температурной ассоциации (с <sup>2</sup> )											
4	85Б-23,0	3-9	131	25,93	3,56	57,73			0,31	0,47	По хлориту
5	85Б-20	5-11	132	28,47	9,10	47,19		3,10	0,15		По эпидоту
6	128А-24,3	5-5	134	30,29	15,64	38,05	1,63	2,40			По биотиту
7	85Б-23,0	7-16	135	26,28	5,74	54,00		0,45			По хлориту
8	85Б-23,0	3-12	140	25,46	3,38	57,96			0,27	0,92	По хлориту
9	85Б-23,0	6-4	143	25,67	3,05	58,04		0,63	0,62		Неустановленного типа
10	85Б-20	1-6	145	26,88	6,80	51,30		2,02	0,33	0,67	Неустановленного типа
11	85Б-39,4	4-9	148	29,07	13,63	42,54	0,38	1,96	0,42		Прожилок
12	85Б-39,4	5-12	152	28,43	12,84	44,52	0,39	1,21	0,36		По плагиоклазу
13	85Б-23,0	3.2-13	153	25,94	5,34	54,70		0,91	0,48	0,63	По хлориту
14	85Б-70,0	5-6	158	29,02	12,54	40,85		5,20	0,39		По хлориту
15	85Б-23,0	3.2-11	159	25,94	5,36	55,25		1,04	0,41		По хлориту
16	85Б-20	4-8	160	27,02	8,21	50,17		2,34	0,27		По хлориту
17	85Б-20	1-5	161	28,55	13,48	41,33	0,63	3,02	0,29	0,69	Реликты в хлорите
18	85Б-35	2-7	161	27,70	11,85	47,25		0,32	0,88		По хлориту
Хлориты третьей температурной ассоциации (с <sup>3</sup> )											
19	85Б-44	1-5	172	28,24	13,66	40,29		4,13	0,27	1,41	По плагиоклазу
20	85Б-11,8	6-12	173	28,54	15,15	38,67		3,08	0,84	0,46	По плагиоклазу
21	85Б-20	2-3	174	31,64	15,33	19,82	0,31	16,81		0,48	По амфиболу
22	85Б-20	1-7	175	25,96	6,96	53,54		1,54			Неустановленного типа
23	85Б-44	8-9	175	28,42	13,00	40,64		5,14	0,37		По пироксену
24	130Б-64,6	6-4	176	26,78	10,82	49,91			0,49		Прожилок
25	85Б-23,0	5-8	177	30,24	19,65	33,03	0,72	4,35			Реликты в хлорите
26	128А-32,2	3-11	180	29,41	16,40	34,06	1,74	5,89	0,18	0,32	По эпидоту
27	85Б-44	14-3	182	27,10	12,66	46,45		0,68	0,56		Неустановленного типа
28	85Б-39,4	1.2-9	187	27,96	13,17	41,54		3,96	1,38		По амфиболу
29	85Б-44	11-5	189	29,98	13,59	28,13		12,70	0,67		Реликты в хлорите
30	128А-32,2	5-4	190	27,15	13,33	43,50	0,33	1,24	1,61		Прожилок
31	85Б-23,0	3.2-12	193	27,02	14,06	45,94		0,40		0,58	Реликты в хлорите
32	85Б-44	10-4	193	28,37	14,59	39,36		5,43	0,26		По хлориту
33	85Б-39,4	2-8	194	27,42	12,65	43,45		3,43	0,72		По биотиту
34	85Б-39,4	3-4	194	27,50	14,34	43,78		1,33	1,05		По плагиоклазу
Хлориты четвертой температурной ассоциации (с <sup>4</sup> )											
35	85Б-44	1-3	204	27,14	14,44	42,38		2,23	0,53	0,75	По хлориту
36	85Б-20	1-4	207	26,59	13,90	43,85	1,36	1,39		0,46	По хлориту
37	85Б-20	6-15	209	26,96	15,76	39,57	0,94	2,27	0,42		По плагиоклазу
38	85Б-39,4	1-2	212	26,61	13,75	45,52	0,26	1,40	0,34		По амфиболу
39	85Б-44	8-6	213	27,31	14,83	41,18		3,65	0,79		По эпидоту
40	85Б-70,0	1-10	214	27,05	13,05	41,09		6,01			Прожилок
41	85Б-44	15-6	217	27,84	13,96	36,99		8,09			По хлориту
42	85Б-35	7-7	223	26,55	15,08	44,94		1,16	0,27		Прожилок

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Хлориты пятой температурной ассоциации (сl <sup>5</sup> )											
43	85Б-20	2-4	241	28,78	16,66	25,81	0,37	13,93	0,24	0,36	По амфиболу
44	85Б-20	6-13	243	26,66	16,07	40,40	0,64	4,07	0,16	0,57	По эпидоту
45	85Б-44	9-13	243	26,21	15,77	43,85		2,17			Неустановленного типа
46	128А-24,3	1-8	245	25,16	14,43	47,14			0,37	0,33	Прожилок
47	85Б-39,4	3-13	246	26,44	16,39	40,59		3,62	0,36		По плагиоклазу
48	85Б-70,0	3а-4	247	26,52	14,02	39,16	0,45	7,29	0,25	0,32	Прожилок
49	128А-32,2	4-3	253	25,75	15,85	44,18	0,36	1,31	0,54		По биотиту
50	85Б-44	15-3	256	25,78	16,16	44,22		1,84			По хлориту
51	85Б-23,0	1-6	261	26,91	12,62	33,83		11,75	0,77		По биотиту
52	85Б-35	6.2-8	266	25,68	17,61	43,62		0,93	0,16		По плагиоклазу
53	128А-32,2	1.3-6	266	26,41	17,22	35,97	1,12	6,53			По эпидоту
54	85Б-35	6-10	268	26,02	18,78	41,33		1,34	0,53		По плагиоклазу
55	85Б-44	5-2	270	26,03	16,77	40,24		4,96			По плагиоклазу
56	85Б-11,8	5-2	271	25,18	16,15	44,42	0,56	1,35	0,34		По плагиоклазу
57	128А-24,3	2-6	273	24,19	13,56	50,07			0,19		По амфиболу
58	128А-24,3	4-6	274	24,48	14,85	48,67					По биотиту
59	85Б-23,0	2.2-1	276	24,28	14,49	45,20	2,49	0,57	0,28	0,69	По андрадиту
60	85Б-35	6-8	278	25,68	17,61	43,62		0,93	0,16		По плагиоклазу
61	85Б-70,0	2-8	278	25,96	16,25	36,85	0,33	7,85			По амфиболу
62	57Б-45	2-7	279	26,47	17,15	34,30	0,33	9,28		0,46	Прожилок
63	85Б-35	5-4	279	25,61	16,14	40,72		4,95			Прожилок
64	85Б-23,0	2-11	281	24,14	14,75	44,91	2,43	0,66	0,19	0,92	По андрадиту
65	85Б-11,8	1-14	281	24,55	16,31	44,03	0,45	1,29		0,69	По плагиоклазу
66	128А-32,2	1.2-18	281	26,13	17,81	35,32	1,10	7,02			По амфиболу
Хлориты шестой температурной ассоциации (сl <sup>6</sup> )											
67	128А-32,2	1.3-1	290	25,72	17,41	36,29	1,12	6,95			По амфиболу
68	128А-32,2	1.3-4	291	25,66	18,64	35,91	1,13	5,46	0,27		По амфиболу
69	128А-32,2	1.2-1	299	25,68	18,39	36,44	0,92	6,57			По амфиболу
70	57Б-45	4-5	302	25,86	18,44	34,91	0,77	8,02			По оливину
71	85Б-23,0	3-8	304	25,76	17,89	34,39	1,18	8,78			Реликты в хлорите
72	128А-32,2	1.3-16	310	24,94	18,22	38,52	1,14	4,76	0,30		По амфиболу
73	128А-24,3	7-11	315	23,78	17,51	46,48			0,22		Неустановленного типа
74	57Б-45	4-7	321	24,95	19,01	35,46	0,59	7,09			По оливину
75	85Б-70,0	5-5	324	25,05	18,54	36,18	0,35	7,87			По амфиболу
76	130Б-64,6	1-8	324	23,28	18,45	39,56	3,51	0,66	0,16	0,38	Прожилок
77	128А-24,3	6-5	332	23,81	19,19	42,91	0,41	1,28	0,39		По амфиболу
78	128А-24,3	3-6	333	23,81	18,79	42,70	0,53	2,18			Прожилок

правило, хлоритами, развивающимися по более ранним хлоритам (рис. 6). Появление теллуридов и самородных элементов с хлоритами низкотемпературной ассоциации не зафиксировано.

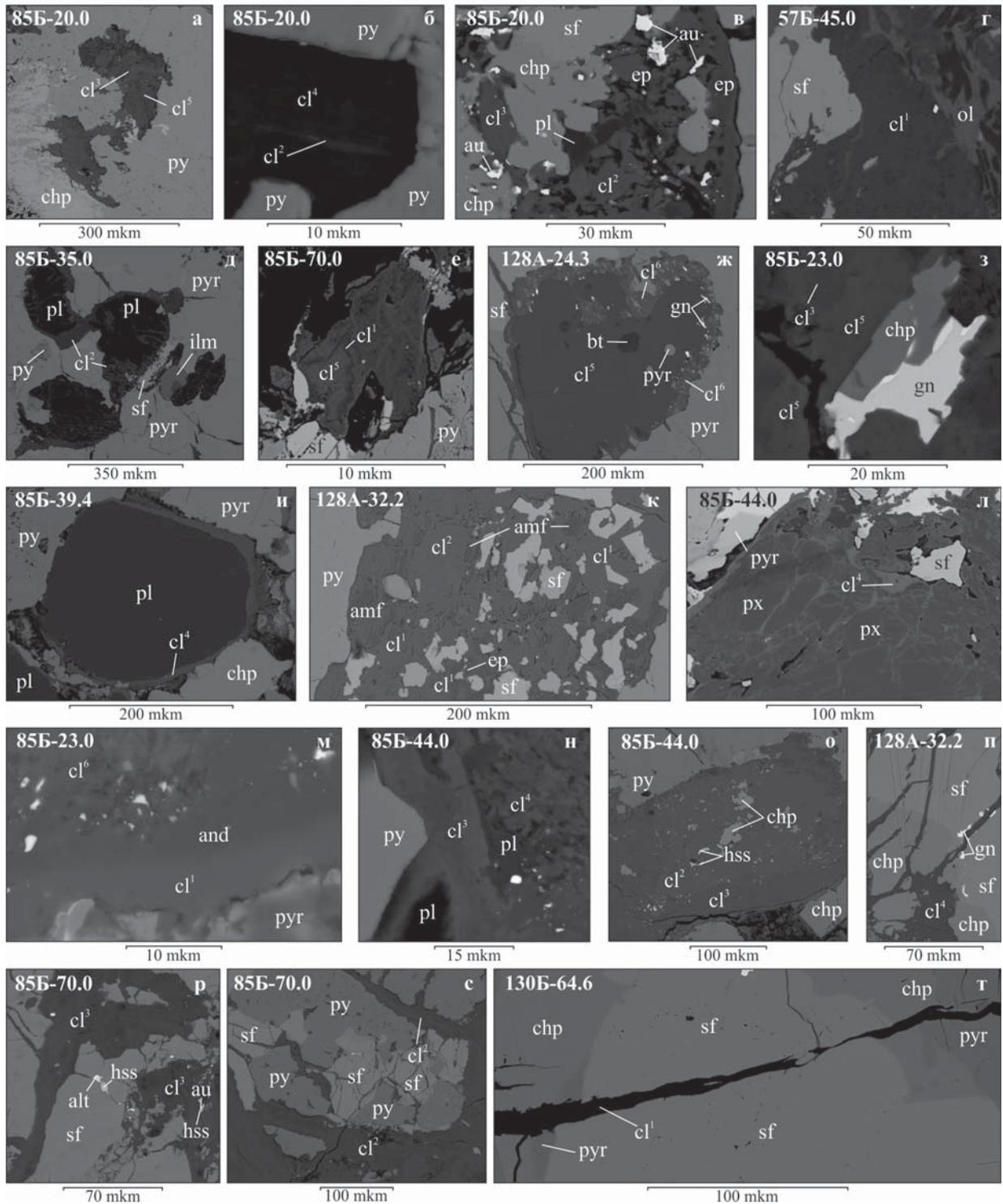
Подводя итог изучения хлоритов, следует отметить, что в одном образце присутствуют как разные формы проявления хлоритов, так и их разные температурные ассоциации. При этом всегда хлориты низкотемпературных ассоциаций являются более поздними по отношению к высокотемпературным, а все изученные

хлоритовые ассоциации сформировались после основной сульфидной минерализации.

#### Обсуждение результатов и выводы

Приведенные данные позволяют говорить о том, что:

1. Наибольшее минералогическое разнообразие теллуридов и самородных элементов характерно для руд залежи «Новая», в рудной залежи «Западная» набор минералов рассматриваемых типов резко ограничен.



**Рис. 6. Формы проявления и взаимоотношения хлоритов разных температурных ассоциаций между собой и с рудообразующими минералами проявления «Западное»:** а —  $cl^5$  замещает  $cl^3$ , оба образуют заливообразные внедрения в сульфиды — халькопирит и пирит; б —  $cl^4$  заместил  $cl^2$ , представляют собой псевдоморфозу по силикатному минералу (предположительно амфиболу); в —  $cl^2$  развивается по эпидоту, частично захватывает плагиоклаз,  $cl^3$  образует самостоятельное выделение, оба имеют заливообразные внедрения в сульфиды — халькопирит и сфалерит, с  $cl^2$  и эпидотом связано появление самородного золота; г —  $cl^1$  развивается по оливину, имеет четкий контакт со сфалеритом; д —  $cl^2$  развивается по плагиоклазу, имеет активные взаимоотношения с пирротинном и сфалеритом, проникая в них по микротрещинам; е —  $cl^5$  развивается по  $cl^1$ , представляют собой псевдоморфозу по силикатному минералу; ж —  $cl^5$  замещает биотит (видны реликты) и сам с краев замещается  $cl^6$ ; з —  $cl^5$  развивается по  $cl^3$ ,  $cl^5$  имеет четкий контакт с халькопиритом; и —  $cl^4$  замещает плагиоклаз и имеет зазубренный контакт с сульфидами (пиритом, халькопиритом и пирротинном); к —  $cl^1$  замещает амфибол и эпидот,  $cl^2$  развивается по  $cl^1$ ; л —  $cl^4$  развивается по пироксену, контакт с сульфидами четкий; м —  $cl^1$  образует «рубашку» по зерну андрадита,  $cl^6$  заместил внутреннюю часть андрадита, с  $cl^6$  связано появление сыпи мелких зерен гессита; н —  $cl^3$  и  $cl^4$  замещают плагиоклаз; о —  $cl^2$  замещает силикат,  $cl^3$  развивается по  $cl^2$ , с  $cl^2$  связано появление гессита; п —  $cl^4$  образует прожилки, рассекающие сульфиды (сфалерит, халькопирит и галенит); р —  $cl^3$  образует прожилки, рассекающие сфалерит, с  $cl^3$  связано появление самородного золота и гессита; с —  $cl^2$  образует прожилки, рассекающие сульфиды (сфалерит и пирит); т —  $cl^1$  образует прожилки, рассекающие сульфиды (сфалерит, халькопирит и пирротин); ol — оливин, ep — эпидот, ilm — ильменит, прочие сокращения и обозначения см. на рис. 3 и 4

2. Серебряная и золотая минерализация представлена преимущественно теллуридами, значительно реже — сульфидами и самородными элементами. Минералы часто имеют сложные взаимоотношения между собой, при этом признаки замещения одних минералов другими отсутствуют.

Серебро образует 5 самостоятельных минеральных форм (в порядке убывания значимости): гессит ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ), штютцит ( $\text{Ag}_5\text{Te}_3$ ), волинскит ( $\text{AgBiTe}_2$ ), матильдит ( $\text{AgBiS}_2$ ), цервеллеит ( $\text{Ag}_4\text{TeS}$ ). Серебро в повышенных концентрациях (до 15 %) присутствует в других теллуридах: мелоните ( $\text{NiTe}_2$ ) и теллурувисмутите ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ).

Золото образует 3 самостоятельные минеральные формы — петцит ( $\text{Au}_3\text{AgTe}_2$ ), электрум и самородное золото. В качестве постоянной и существенной примеси золота присутствует в цервеллеите (до 3,6 %), изредка — в гессите (до 2,5 %).

Гессит является сквозным минералом, зафиксирован в обоих рудных телах, во всех минералогических типах руд, на всех глубинах.

Угловатая, ксеноморфная форма выделения агрегатов и выдержанность минерального состава теллуридной минерализации может являться результатом кристаллизации относительно низкотемпературного расплава среди термически более устойчивых силикатных и сульфидных фаз [11, 12].

Присутствие благороднометалльной теллуридной минерализации в медно-цинковых рудах фиксируется на многих месторождениях [2, 3, 6, 7 и др.]. Теллуридная форма золота и серебра в рудах, возможно, отражает верхний эпипермальный уровень оруденения по аналогии с месторождениями Биргильдинско-Томинского рудного узла.

3. Благороднометалльная минерализация приурочена главным образом к основным рудообразующим минералам — сфалериту и пирротину, реже — галениту. Приуроченность золотосеребряной минерализации к сульфидам цинка (сфалерит) демонстрирует близость проявления «Западное» к современным колчеданным постройкам Мир и ТАГ Срединно-Атлантического хребта [5].

Наблюдается тесная пространственная, а возможно и парагенетическая связь с вторичными минералами — эпидотом и хлоритом.

На основании изучения хлоритов выделено 6 температурных ассоциаций этих минералов; форма проявления хлоритов четко связана с температурой их образования. Проявление благороднометалльной минерализации обнаруживает связь с четырьмя ассоциациями хлорита (за исключением низко- и высокотемпературных). При этом гессит обнаруживает связь с хлоритами как минимум трех ассоциаций в диапазоне температур 131–281°C. Этот факт объясняет сквозной характер минерала.

В работе [8] указывается, что теллуридная минерализация в рудах колчеданных месторождений является многостадийной и связана как с процессами первичного накопления сульфидов, так и последующими на-

ложенными процессами — регионального метаморфизма на уровне зеленосланцевой и пренит-пумпеллитовой фаций, а также как продукт анатексиса сульфидных руд, подвергнутых контактовому и региональному метаморфизму. Исходя из минералогических особенностей руд проявления «Западное» (присутствие типично скарных, метаморфогенных и низкотемпературных гидротермальных парагенезисов и связанных с ними теллуридов), изученные образцы демонстрируют именно такую многостадийность.

Таким образом, происхождение рудных ассоциаций с редкими минералами Au и Ag проявления «Западное» связано, по всей видимости, с наложенными процессами гидротермального преобразования колчеданных залежей.

4. Особенности геологической позиции проявления «Западное» и минералогии благородных металлов практически соответствуют Тарньерскому медноколчеданному месторождению [6]. Отличительная черта — отсутствие теллуридно-висмутовой минерализации [1] и приуроченность благороднометалльной минерализации ко всем типам руд.

Автор благодарен старшему научному сотруднику лаборатории Региональной геологии и геотектоники Института геологии и геохимии УрО РАН им. акад. А.Н. Заварицкого Степану Васильевичу Берзину за помощь в расчетах температуры образования хлоритов и ценные советы при подготовке материалов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры в рамках научного проекта № 18–45–860008 и Русского Географического Общества (договор № 05–2019-Р).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белогуб, Е.В. Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) / Е.В. Белогуб, В.П. Молошаг, К.А. Новоселов, В.А. Котляров // Записки РМО. — 2010. — № 6. — С. 108–119.
2. Бортников, Н.С. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) / Н.С. Бортников, Х. Крамер, А.Д. Генкин и др. // Геология рудных месторождений. — 1988. — № 2. — С. 49–61.
3. Дамдинов, Б.Б. Состав и условия формирования оруденения золото-теллуридного типа в Тисса-Сархойской золоторудной провинции (Восточный Саян) / Б.Б. Дамдинов, А.Г. Миронов, А.А. Боровиков и др. // Геология и геофизика. — 2007. — Т. 48. — № 8. — С. 833–847.
4. Зеленов, В.И. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд / В.И. Зеленов. — М.: Недра, 1989. — 302 с.
5. Мозгова, Н.Н. Благородные металлы в сульфидных ассоциациях глубоких частей активной постройки ТАГ (Срединно-Атлантический хребет. 26°08' с.ш.) / Н.Н. Мозгова, Ю.С. Бородаев, Т.В. Степанова и др. // Литология и полезные ископаемые. — 2000. — № 1. — С. 5–24.
6. Молошаг, В.П. Условия образования теллуридов в колчеданных рудах Урала / В.П. Молошаг // Ежегодник-2010. Труды ИГГ УрО РАН. — 2011. — № 158. — С. 140–143.
7. Молошаг, В.П. Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золото-порфириновых месторождений Урала / В.П. Молошаг, А.И. Грабежов, И.В. Викенъев, Т.А. Гуляева // Литосфера. — 2004. — № 2. — С. 30–51.
8. Молошаг, В.П. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфириновых месторождений Урала / В.П. Молошаг, А.И. Грабежов, Т.Я. Гуляева // Записки ВМО. — 2002. — Ч. 131. — № 5. — С. 40–54.

9. Сафина, Н.П. Минералого-геохимические особенности сульфидных руд рудопроявления «Западное», Приполярный Урал / Н.П. Сафина, В.В. Масленников, С.П. Масленникова // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа–Югры. — Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2010. — Кн. 2. — С. 492–500.

10. Cathelineau, M. Chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system / M. Cathelineau, D.A. Nieva // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1985. — Vol. 91. — № 3. — PP. 235–244.

11. Ciobanu, C.L. Gold scavenged by bismuth melts: An example from Alpine shear-remobilizates in the Highiş Massif, Romania / C.L. Ciobanu, N.J. Cook, F. Damian, G. Damian // Mineralogy and Petrology. — 2006. — № 87. — PP. 351–384.

12. Tomkins, A.G. Three mechanisms of ore re-mobilisation during amphibolites facies metamorphism at the Montauban Zn–Pb–Au–Ag deposit / A.G. Tomkins // Mineralium Deposita, 2007. — V. 42. — PP. 627–637.

© Кудрин К.Ю., 2019

Кудрин Константин Юрьевич // kudringeo@inbox.ru

УДК 550.8 681.3

Галюк С.В. (ФГБУ «ИМГРЭ»)

### ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД

*В статье дан краткий обзор наиболее распространенных геохимических классификаций и их базовые таксономические принципы. Предложена версия классификации элементов для атмо- и литохимических методов при поисках коренного гидротермального полисульфидного оруденения. Сформулированы базовые принципы разделения элементов на группы. В качестве иллюстрации правомочности предложенных принципов приводятся две эмпирически полученные закономерности. **Ключевые слова:** геохимическая классификация элементов, атмо- и литохимические методы поисков, элементы-индикаторы.*

Galyuk S.V. (IMGRE)

### GEOCHEMICAL CLASSIFICATION OF CHEMICAL ELEMENTS: HISTORY AND CURRENT VIEWS

*The paper presents a brief overview of the most common geochemical classifications and their basic classification principles. The aspects of the classification of chemical elements as tools of the gas and soil surveys for the bedrock hydrothermal polysulfide mineralization are provided. The basic classification principles of chemical elements are formulated. To illustrate the validity of the proposed principles, two empirically derived patterns are presented. **Keywords:** geochemical classification of chemical elements, gas and soil surveys, pathfinder and indicator elements.*

Классификация в любой науке обобщает и фиксирует актуальный (на дату ее создания) уровень развития данного научного направления. Цель классификации объектов — суммирование знаний на определенном этапе развития науки, объединение изучаемых объектов по определенным критериям в таксоны для

решения задач конкретной направленности. Как правило, в основе любой геохимической классификации химических элементов на сегодняшний день лежит Периодическая система элементов Д.И. Менделеева. В настоящее время в геохимии известны более полутора десятков классификаций химических элементов. Наиболее известными из них являются классификации В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана, В.И. Вернадского, А.Н. Заварицкого, А.А. Саукова, А.И. Перельмана.

Классификации А.Е. Ферсмана, А.Н. Заварицкого и А.А. Саукова основаны на поведении химических элементов в гипогенных условиях; В.М. Гольдшмидта и В.И. Вернадского — отражают поведение элементов как в гипо- так и гипергенных условиях. Классификация А.И. Перельмана соответствует поведению химических элементов в условиях зоны гипергенеза в различных ландшафтах.

В 1911 г. **В.М. Гольдшмидт** опубликовал первую в истории геохимическую классификацию, в которой все элементы в зависимости от их преобладания в одной из природных сред разделены на атмофильные элементы, тяготеющие к атмосфере; сидерофильные, связанные с большими глубинами планеты, родственные с входящим в эту группу железом (металлическое ядро); халькофильные, тяготеющие к меньшим глубинам, чем сидерофильные элементы (сульфидметаллическое ядро) и литофильные элементы, приуроченные к сиалической оболочке Земли. В более поздних изданиях автор ввел группу биофильных элементов.

Классификация В.М. Гольдшмидта сохранила свое значение и широко используется в практике геохимических работ, несмотря на то что его гипотеза о строении Земли представляет лишь исторический интерес в плане развития науки. В.М. Гольдшмидт сравнил дифференциацию элементов в расплавленной планете с выплавкой металлов из руд, когда на дно металлургической печи опускается тяжелый металл с плотностью 7 и более г/см<sup>3</sup>, а на поверхность всплывает легкий силикатный шлак (аналог земной коры). Между ними располагается слой «штейна» (сульфида Fe) с примесью сульфидов других металлов (аналог мантии) (рис. 1).

*Литофильные элементы* образуют кислородные соединения, их ионы имеют 8-электронную оболочку. К ним относятся 54 элемента (Si, Fe, Ti, Cl, Br, B, Al, Ca, Mg и др.). Для *халькофильных элементов* характерно взаимодействие с серой, а также селеном и теллуром. Внешняя оболочка катионов имеет 18-электронную конфигурацию (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Co и др.). Природные соединения образуют сульфиды и их аналоги. *Сидерофильные элементы* (Ni, Mo, Co, Os, Pd, Ir, Pt, Au, Ta и др.) в расплавах соединяются с железом. Они представлены атомами, которые образуют переходные ионы с внешней оболочкой 9–17-электронной конфигурации. *Атмофильные элементы* характерны для атмосферы, их атомы имеют электронную конфигурацию инертных газов (2–8-электронную). *Биофильные элементы* (C, H, O, N, P, S, Cl, Na, Ca, Mg, Fe и др.) концентрируются в живых организмах с образованием