

УДК 551

## МИНЕРАЛЬНЫЕ ФАЗЫ ЦИНКА В РУДОНОСНЫХ ОСАДКАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО УЗЛА ПОБЕДА (17°07.45'–17°08.7' с.ш. САХ)

© 2022 г. А. Д. Люткевич<sup>а, \*</sup>, И. Ф. Габлина<sup>а</sup>, О. М. Дара<sup>б</sup>,  
В. О. Япаскурт<sup>с</sup>, В. Д. Щербаков<sup>с</sup>, П. А. Сомов<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия

<sup>с</sup>Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>д</sup>Лаборатория материалов с упорядоченной структурой Сколковского института науки и технологий, Инновационный центр Сколково, Москва, 121205 Россия

\*e-mail: nastya.lyutkevich@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

Работа посвящена изучению минерального состава рудоносных осадков гидротермального узла Победа (САХ) и является продолжением предыдущих исследований [Габлина и др., 2021]. Описаны редкие минералы цинка (фосфаты цинка, цинкит, виллемит, ганит(?), цинксодержащий форстерит), большая часть которых впервые установлена в донных осадках Срединно-Атлантического хребта. Исследования проведены комплексом методов: сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ, рентгеновская дифрактометрия, спектроскопия комбинационного рассеяния и дифрактометрия обратно рассеянных электронов.

**Ключевые слова:** Срединно-Атлантический хребет, карбонатные металлоносные и рудоносные донные осадки, минеральный состав, редкие минералы цинка.

**DOI:** 10.31857/S0024497X22050044

При изучении донных осадков океана было обнаружено, что биогенные карбонатные илы зон активных срединно-океанических хребтов, в нижнем горизонте, непосредственно залегающем на породах ложа, содержат аутигенные минералы, не характерные для зон подводного выветривания (гальмиролиза) – гидроксиды железа, “неорганические” карбонаты, и обогащены Fe, Mg, Mn, V, As, U, Cd, Zn, В, Hg, в некоторой степени также Ba и P [Skornyakova, 1964; Boström et al., 1969; Boström, Fischer, 1971; Bonatti et al., 1971]. В то же время они крайне бедны Al, Ti, Si, входящими в состав “фоновых” осадков, удаленных от областей гидротермальной активности. Изотопный состав кислорода в аутигенных карбонатах нижнего горизонта осадков в активных зонах свидетельствует об их высокотемпературном происхождении, а иловые воды, как и придонные, в этих районах обладают относительно низкими значениями pH – около 7.4 [Bonatti, 1966; Park, 1966; Розанова, 1977; Бострём и др., 1973]. Геохимические исследования образцов донных осадков Северной Атлантики, полученных при глубоководном бурении (Deep Sea Drilling Project, DSDP), показали присутствие базального горизонта, обо-

гашенного Mg, Mn, Ni, Cu, Zn и Pb в отложениях разного возраста, начиная с мелового времени [Hogowitz, 1976]. Автор приведенной работы связывает обогащение базального горизонта металлами с различными процессами на границе осадков с базальтами, в том числе с воздействием гидротермальных растворов.

Исследования, проведенные нами в Российском разведочном районе (13°–20° с.ш. Срединно-Атлантического хребта) также показали обогащение рудными элементами базального слоя донных осадков и присутствие в них сульфидных построек гидротермально-метасоматического типа в зонах гидротермальной активности [Габлина и др., 2010, 2017 и др.]. Мощность осадков в этой зоне редко превышает 50–70 см, и они, как правило, бывают гидротермально изменены по всему разрезу. При этом формируется минерально-геохимическая вертикальная зональность, выражающаяся в смене вниз по разрезу карбонатно-атакамитового парагенезиса аутигенных гидротермальных минералов сначала на оксидный (оксиды и гидроксиды Fe и Mn), а затем на сульфидный (пирит, марказит, сульфиды Cu) [Русakov и др., 2013; Габлина и др., 2017].

В 2014–2015 гг. в рейсе № 37 НИС “Профессор Логачев”, организованном Полярной Морской Геологоразведочной Экспедицией<sup>1</sup>, при проверке аномалий потенциала естественного электрического поля (ЕП) в блоках 37 и 39 Российского разведочного района был открыт рудный узел Победа (рис. 1).

Донные осадки гидротермального узла Победа исследованы и описаны в публикациях [Бельтнев и др., 2016; Бич, 2017; Бич, Петров, 2018; Габлина и др., 2021]. Наиболее подробно осадки изучены по колонкам станций 37L215k, 37L184k, 37L244g, 37L245g (рис. 2), при этом было установлено несколько типов минерально-геохимической зональности, связанных с различными механизмами обогащения осадков рудными компонентами [Габлина и др., 2021]. Особый интерес вызывает колонка 37L245g (поле Победа-2), в которой установлена необычная цинковая и фосфатная минерализация. Данная работа является продолжением изучения редких минеральных фаз цинка по материалам станции 37L245g.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО УЗЛА ПОБЕДА

Рудный узел Победа расположен на восточном борту рифтовой долины и приурочен к западному склону горного массива 17°09′ с.ш. Он располагается в пределах 17°07.45′–17°08.7′ с.ш. САХ и включает гидротермальные рудные поля Победа-1, Победа-2 и рудопроявление Победа-3 (см. рис. 2). Склон расчленен многочисленными сбросами и трещинами, крутизна склона составляет в среднем около 20°, а на отдельных участках достигает 30°. В районе рудного поля Победа-2 на станции 37L199z, где наблюдался 125-метровый слой с повышенными значениями мутности, были выявлены признаки гидротермального плюма, но, тем не менее, на распределение мутности не исключается влияние процессов гравитационного сноса осадков в условиях крутых склонов, а также техногенный фактор, связанный с проведением геологических работ [Бельтнев и др., 2016].

В геологическом строении района принимают участие базальты, породы интрузивного габбро-перидотитового комплекса и перекрывающие их донные осадки. Наибольшим распространением пользуются сильно измененные (серпентинизированные и оталькованные) габбро и перидотиты, занимающие более половины площади поля.

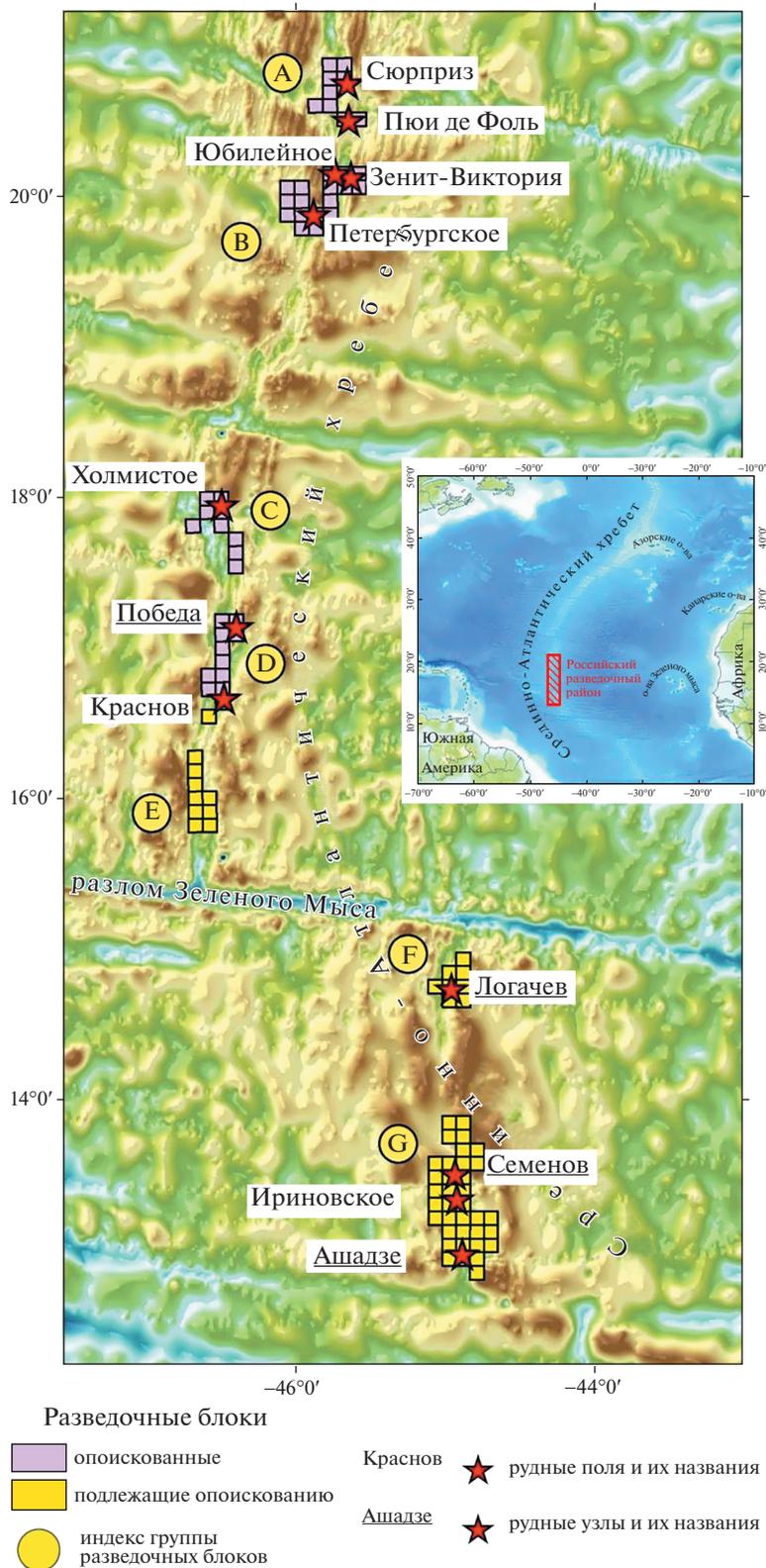
Осадки голоцен–верхне-среднеплейстоценового возраста представлены карбонатными

кокколит-фораминиферовыми илами, иногда с включениями раковин птеропод и эдафогенного материала. Четвертичные осадки вскрыты на глубину 140 см (ст. 37L216k). По данным придонного профилографа системы ГБО “МАК-1М”, мощность осадков в пределах разведочных блоков не превышает первых метров и в редких случаях достигает 10 м. Максимальная мощность установлена в понижениях между грядами и холмами. В пределах гидротермальных полей развиты рудные, рудоносные и металлоносные осадки мощностью 50–75 см. Классификация осадков основана на величинах содержания в них Fe и [Cu + Zn], пересчитанных на бескарбонатное вещество –  $Fe_{\text{бкв}}$  и  $[Cu + Zn]_{\text{бкв}}$ . В фоновых карбонатных осадках  $Fe_{\text{бкв}} < 10\%$ ; в металлоносных –  $10\% \leq Fe_{\text{бкв}} < 30\%$ ,  $[Cu + Zn]_{\text{бкв}} < 0.10\%$ ; в рудоносных –  $10\% \leq Fe_{\text{бкв}} < 30\%$ ,  $[Cu + Zn]_{\text{бкв}} \geq 0.25\%$ ; в рудных –  $Fe_{\text{бкв}} \geq 30\%$  и  $[Cu + Zn]_{\text{бкв}} \geq 0.25\%$  [Бельтнев и др., 2016].

Станция 37L245g расположена на периферии поля Победа-2 и является самой глубоководной из всех поднятых колонок (глубина 3106 м), ее длина составляет 50 см. Предыдущими исследованиями [Габлина и др., 2021] в ней установлено три максимума накопления Cu и Zn: в средней части (горизонт 31–35 см), а также в кровле и подошве разреза. Похожий характер распределения имеет и Fe. Окислительный потенциал поровых растворов, при общей тенденции к снижению вниз по разрезу, обнаруживает существенные колебания. Минимальные его значения зафиксированы в забое колонки (–107.6 мВ) и в интервале 31–38 см (–110.5 мВ), и совпадают с максимумами накопления в осадках рудных компонентов. Максимальные значения Eh отмечаются в поверхностном слое (+215 мВ) и в интервале 25–30 см (+108 мВ), соответствующем прослою птероподовых песков (рис. 3). Аналогичным образом меняются и значения pH. Возрастание параметров Eh–pH в интервале 25–30 см, вероятно, объясняется высокой пористостью птероподового прослоя и большей насыщенностью его морской водой по сравнению с вмещающими кокколит-фораминиферовыми илами.

Во всех трех интервалах повышенных содержаний Fe, Cu, Zn присутствуют как оксидные, так и сульфидные формы рудных элементов, что свидетельствует о неравновесной обстановке рудообразования. В базальном горизонте преобладают сульфиды, а среди них – пирит, марказит. В этом же слое зафиксировано максимальное содержание серпентина и талька – продуктов разрушения серпентинизированных и оталькованных ультраосновных пород субстрата. В образцах, отобранных из интервалов 14–18 см и 35–38 см, электронно-зондовым анализом были установлены фосфаты цинка и цинкит [Габлина и др., 2021].

<sup>1</sup> Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция, раздел – исследования, поиск твердых полезных ископаемых Мирового океана. Электронный ресурс URL: <http://www.pmge.ru/index.php?id=665&lang=RUS> (дата обращения: 27.04.2022).



**Рис. 1.** Российский разведочный район, Срединно-Атлантический хребет (схема по [Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция, раздел – исследования, поиск твердых ископаемых Мирового океана. Электронный ресурс URL: <http://www.pmge.ru/index.php?id=665&lang=RUS> (дата обращения: 27.04.2022)]).

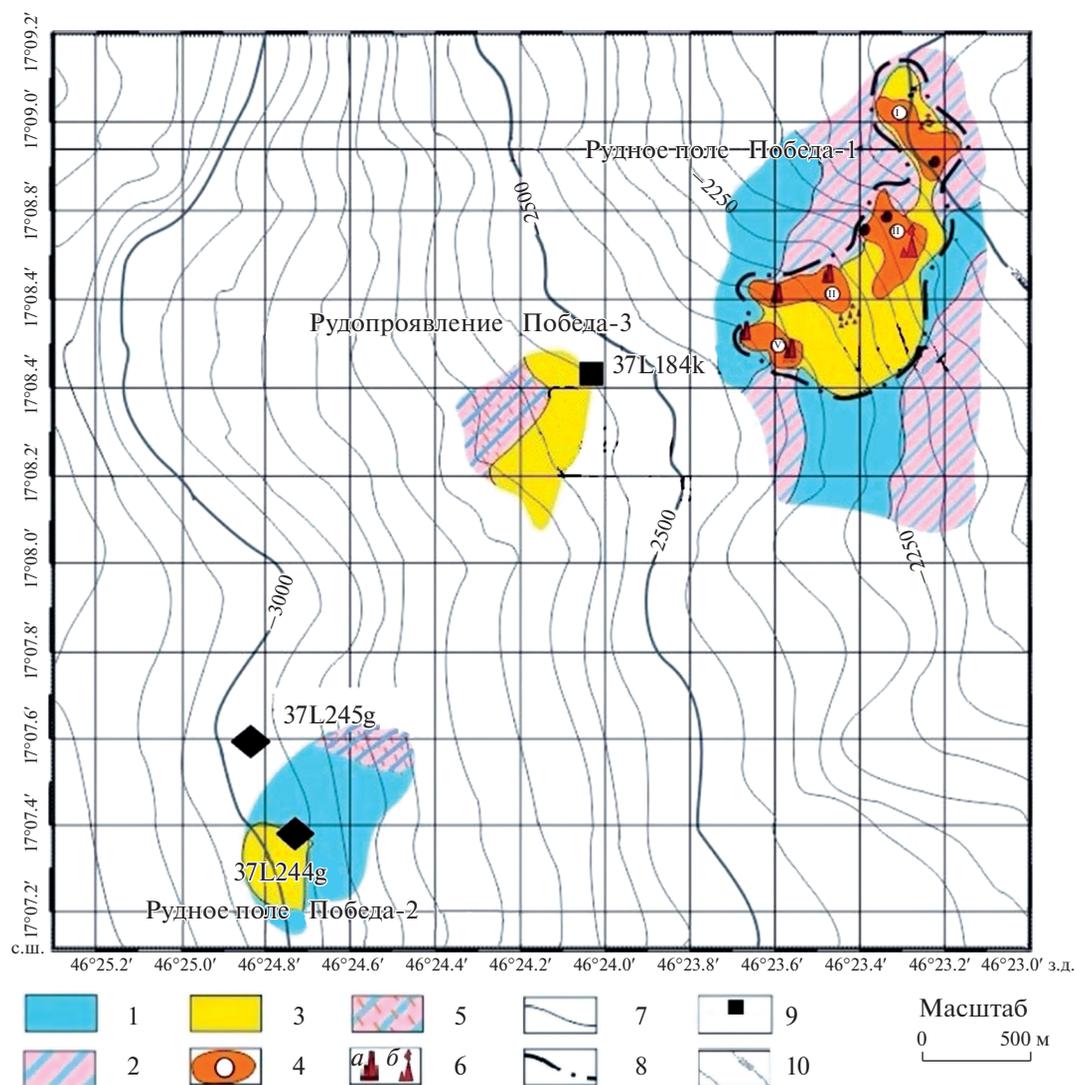


Рис. 2. Схема гидротермального узла Победа.

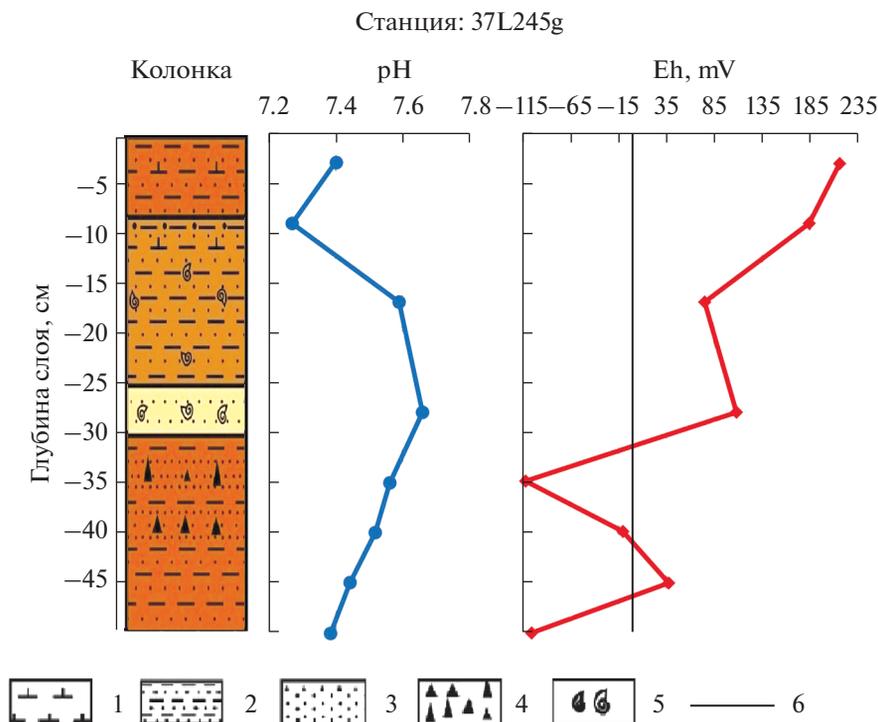
1 – кокколлит-фораминиферовые илы; 2 – магматические породы, частично покрытые карбонатными осадками; 3 – металлоносные осадки; 4 – рудные тела; 5 – гидротермально измененные породы; 6 – сульфидные постройки (*a* – неактивные, *b* – активные); 7 – геологические границы по данным телепрофилирования; 8 – границы рудного поля; 9 – станции отбора проб и их номера; 10 – изобаты (по материалам [Бельтнев и др., 2016]).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рудоносные осадки станции 37L245g (Победа-2) были подняты телегрейфером. Физико-химические параметры поровых вод осадков измерены с помощью потенциометра “Эксперт-pH”. Образцы, отобранные из интервалов: 245-1 (3–10 см), 245-3 (14–18 см), 245-3а (18–20 см), 245-6 (35–38 см), 245-9 (48–50 см) были изучены на оптическом микроскопе “Ахиоплан2” фирмы Zeiss.

Изучение элементного состава минералов этих проб проводилось в прозрачно-полированных шлифах при помощи сканирующего электронного микроскопа “JSM-IT500” (“Jeol”, Япония), оснащенного энергодисперсионным спектрометром “X-Max-n” (“Oxford Instrument”, Вели-

кобритания) (аналитик В.О. Япаскурт, МГУ им. М.В. Ломоносова). Для анализа всех элементов использовались К-серии эмиссионных линий; сравнительно простой химизм и отсутствие интерференций эмиссионных линий в энергодисперсионных спектрах дали возможность прямого измерения концентрации кислорода. Локальные измерения осуществлялись в режиме сфокусированного зонда при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда  $0.7 \pm 0.05$  нА. Средняя скорость обработки данных составляла около 14 тыс. имп/сек, а величина “мертвого” времени не превышала 25%. Экспозиция в каждом измерении нормализовалась по величине “живого” времени и составляла 70 с.



**Рис. 3.** Колонка станции 37L245g и изменение значений Eh и pH по разрезу осадков (разрез колонки, по [Бельтнев, 2016]).

1–3 – литология: 1 – фораминифер-кокколитовый ил, 2 – пелит с примесью песчаной фракции, 3 – песок; 4, 5 – включения: 4 – фрагментов сульфидных руд, 5 – детрита птеропод; 6 – граница между слоями.

Обработка энергодисперсионных спектров проводилась с использованием ХРР-коррекции в программе “INCA” (версия 21b, производство “Oxford Instruments”, Великобритания).

Для уточнения минеральных фаз применялись следующие структурно-чувствительные методы: рентгенодифрактометрический метод (аналитик О.М. Дара, ИО им. П.П. Ширшова РАН), спектроскопия комбинационного рассеяния (аналитик В.Д. Щербаков, МГУ им. М.В. Ломоносова) и метод дифракции обратно рассеянных электронов (аналитик П.А. Сомов, ООО “Тескан”).

Минеральный состав образцов был изучен методом порошковой рентгеновской дифрактометрии (рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE Bruker AXS, Germany, Cu-K $\alpha$ , с Ni 0.02 фильтром, 40 kV, 40 mA, с линейным детектором LYNXEYE) в Аналитической лаборатории ИО РАН. Сканирование проводилось в дискретном режиме с шагом 0.02°2 $\theta$ , экспозицией 4, 8, 12 с/шаг в интервале 2.5–70°2 $\theta$ , с вращением образца. Первичная обработка спектров, расшифровка, полуколичественный анализ проб проводились с использованием базы данных ICDD (International Centre for Diffraction Data, PDF-2) и программы diffract.EVA-V5.0.0.22 из пакета дифрактометра. Тяжелая фрак-

ция (с удельным весом более 3 г/т) была выделена методом деления в тяжелых жидкостях (тетрабромэтан) в ГИН РАН с предварительным рассеиванием на сите с размером ячейки 0.16 мм.

Спектроскопия комбинационного рассеяния была выполнена на автоматическом рамановском спектрометре XPloRA (Horiba Scientific), совмещенном с конфокальным микроскопом, при длине волны 532 нм на кафедре петрологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Дифракция обратно рассеянных электронов (EBSD) – проводилась в демонстрационном зале ООО “Тескан” на сканирующем электронном микроскопе TESCAN CLARA, с внутрикамерными детекторами Oxford Instruments Ultim Max 100 (микроанализ EDS, Великобритания), Oxford Instruments Nordlys Nano (микроанализ EBSD, Великобритания). Измерение осуществлялось с ускоряющим напряжением 20.00 кВ, скоростью накопления 53.20 Гц. Для обработки дифракционных картин использовалась программа Oxford Instruments Aztec.

Предварительная полировка образцов выполнена коллоидным раствором в Институте кристаллографии РАН.

**Таблица 1.** Химический состав цинкита ZnO из рудоносных осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа				
	245-3_10	245-3_11	245-3_18	245-3_25	245-6_01
Mg	2.36	2.46	2.26	2.21	3.21
Al	0.11	0.17	0.51	0.43	0.2
Ca	н.о.	н.о.	0.31	н.о.	н.о.
Fe	0.47	0.18	0.17	0.11	0.86
Zn	80.22	80.58	78.11	81.11	78.81
O	17.79	18.48	18.70	19.03	19.54
Сумма	102.7	103.14	101.05	102.02	100.24
Формула из расчета на 2 атома					
Mg	0.08	0.08	0.07	0.07	0.10
Al	—	0.01	0.02	0.01	0.01
Ca	—	—	0.01	—	—
Fe	0.01	н.о.	—	—	0.01
Zn	1.00	0.99	0.96	0.98	0.93
O	0.91	0.92	0.94	0.94	0.95

Примечание. н.о. — не обнаружено.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РУДОНОСНЫХ ОСАДКОВ КОЛОНКИ 37L245G (ПОБЕДА-2)

#### Результаты электронно-зондовых исследований

**Образец 245-1 (интервал 3–8 см)** представляет собой сильно ожелезненную бурую массу с редкими раковинами фораминифер кальцитового состава и эдафогенным материалом, представленным серпентином (рис. 4а), биотитом (см. рис. 4б). Кальцитовые раковины без изменений, внутренние части раковин либо пустые, либо заполнены мелким эдафогенным материалом состава (мас. %): O 31.35, Si 14.94, Al 7.2, Ca 5.4, Fe 4.93, K 2.14, Mg 1.4 (общ. 68.4) (см. рис. 4в).

Обнаруженные сульфиды представлены изокубанитом  $\text{Cu}_{0.84-1.05}\text{Fe}_{1.93-2.1}\text{S}_{2.98-3.03}$  и пирротинном  $\text{Fe}_{0.85}\text{S}$ . Изокубанит образует скопления изометричных зерен (см. рис. 4г) и отдельные зерна (см. рис. 4д), частично замещенные гётитом  $\text{FeO}(\text{OH})$  (по данным рентгенофазового анализа). В изокубаните наблюдается примесь кобальта и никеля.

Пирротин (см. рис. 4в) представлен единичными удлинёнными зёрнами без признаков замещения. В пирротине ( $\text{Fe}_{0.85}\text{S}$ ) присутствует примесь Co (0.23 мас. %) и Ni (0.74 мас. %).

**Образец 215-3 (интервал 14–18 см)** представляет собой карбонатный осадок, пропитанный гидроксидами железа, с обломками нерудных минералов (серпентин, пироксен) и редко встречающи-

мися раковинами фораминифер. Отличительной особенностью образца является присутствие соединений цинка и фосфора, наблюдающихся по всему шлифу.

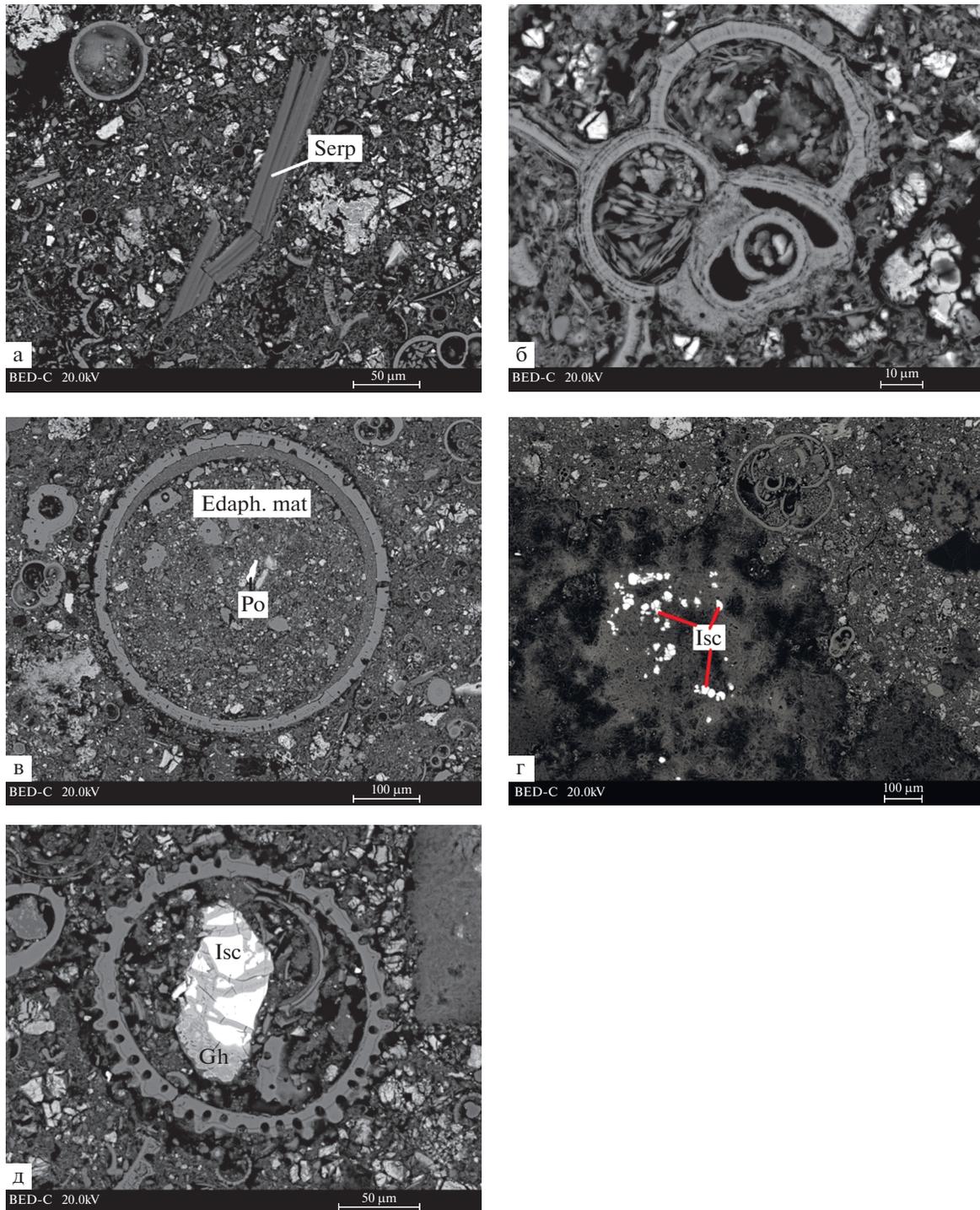
Цинкит  $\text{ZnO}$  в виде округлых образований занимает местами до 30% площади шлифа (рис. 5а), которые, возможно, заполняют поры (см. рис. 5б) или образуют срастания с цинксодержащим форстеритом  $\text{Mg}_{1.65}\text{Zn}_{0.37}\text{SiO}_{3.89}$  (Zn до 15.75 мас. %) (см. рис. 5б, табл. 1).

Встречаются крупные (до 200 мкм) волокнистые образования со средним составом (по четырем анализам):  $\text{P}_2\text{O}_5$  39.76,  $\text{ZnO}$  25.73,  $\text{SiO}_2$  13.83,  $\text{MgO}$  6.53,  $\text{FeO}$  5.92,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  4.23,  $\text{CaO}$  2.14,  $\text{CuO}$  0.88 (сумма 98.6) (см. рис. 5а, ан. 1–4).

Межзерновое пространство заполнено фазой состава:  $\text{P}_2\text{O}_5$  41.35,  $\text{ZnO}$  38.93,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5.28,  $\text{CaO}$  3.17,  $\text{SiO}_2$  2.16,  $\text{MgO}$  1.85,  $\text{FeO}$  0.42 (сумма 93.28) (см. рис. 5а, ан. 7).

Серпентин замещается фосфатами цинка, формируя фазу состава (%): Mg 1.34, Al 3.19, Si 0.55, P 20.31, Ca 1.8, Cr 0.28, Fe 0.51, Zn 27.53, O 41.83 (сумма 97.29) (см. рис. 4в).

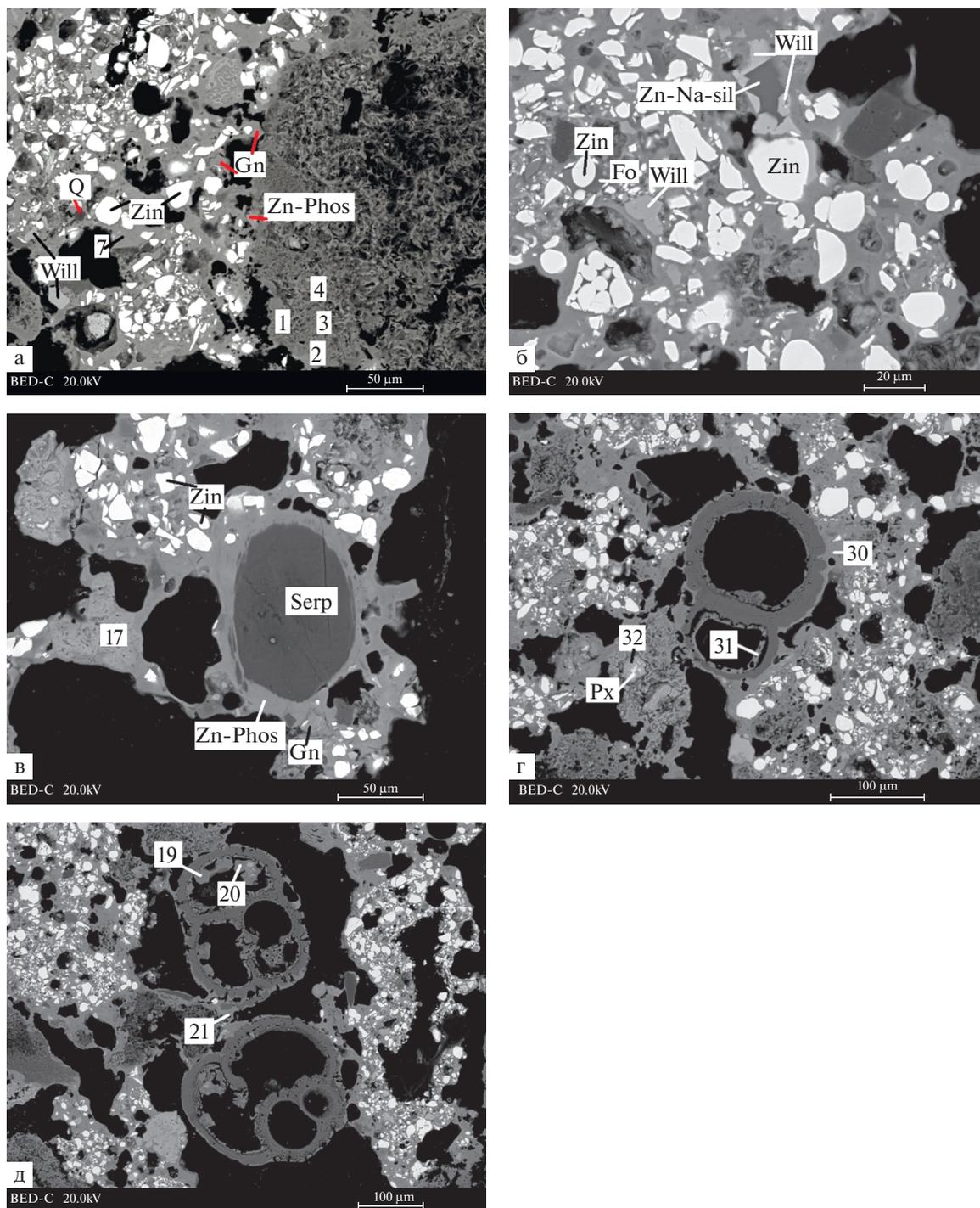
Кальцитовые раковины и редкие зерна пироксенов замещаются фосфатом цинка, образуя фазы смешанного состава:  $\text{MgO}$  1.08–1.69,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  4.84–6.49,  $\text{SiO}_2$  0.55–1.27,  $\text{P}_2\text{O}_5$  43.87–49.01,  $\text{CaO}$  6.2–12.09,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до 0.35,  $\text{FeO}$  0.34–1.18,  $\text{ZnO}$  27–33.36 (см. рис. 5г, ан. 30–32, 4д, ан. 19–21).



**Рис. 4.** Фотографии шлифов рудоносных осадков в отраженных электронах. Образец 245-1. Интервал 3–8 см. а – обломок серпентина (Serp) в общей массе ожелезненного осадка; б – кальцитовая раковина без следов замещения; в – скопление эдафогенного материала (Edaph.mat) во внутренней части кальцитовой раковины. Зерно пирротина (Po); г – скопление изометричных зерен изокубанита (Isc); д – единичное зерно изокубанита (Isc), частично замещенное гётитом (Gh).

Виллемит с идеальной формулой  $Zn_2SiO_4$  представлен угловатыми изометричными выделениями, размером до 10 мкм (см. рис. 5а, б). Также виллемит замещает по краям неустановленную фазу (возмож-

но, гаултит с идеальной формулой  $Na_4Zn_2Si_7O_{18} \cdot 5H_2O$ ) с составом (мас. %): Si 30.41, Zn 14.55, Na 12.05, Mg 2.47, Al 1.38, Ca 1.25, K 0.6, FeO 0.47, S 0.02, F 1.36, O 43.45 (сумма 108.02) (см. рис. 5б, табл. 2).



**Рис. 5.** Фотографии шлифов рудоносных осадков в отраженных электронах (цифрами обозначены точки анализов). Образец 245-3. Интервал 14–18 см.

а – ан. 1–4 – неустановленная фаза, рядом – фосфат цинка (Zn-phos), ан. 7 – неустановленная фаза, заполняющая межзерновое пространство осадка, отдельные зерна виллемита (Will), цинкита (Zin), ганита(?) (Gn), кварца (Q); б – агрегат силиката цинка–натрия (Na–Zn-sil) и виллемита (Will), зерна виллемита (Will), цинкита (Zin), агрегат цинкита и цинксодержащего форстерита (Fo); в – замещение зерна серпентина (Serp) фосфатами цинка (Zn-phos), зерна цинкита (Zin), зерно ганита(?) (Gn), ан. 17 – смесь фосфатов цинка и оксидов (гидроксидов?) железа; г – каймы замещения кальцита и пироксена (Px) фосфатом цинка (ан. 30–32); д – каймы (ан. 19–21) вокруг раковин, состоящие из смеси фосфата цинка и кальцита.

**Таблица 2.** Химический состав виллемита  $(\text{Zn}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$  из рудоносных осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа					
	245-3_08	245-3_09	245-3_22	245-3_24	245-6_03	245-6_10
Mg	6.96	7.89	4.63	8.63	2.7	7.23
Al	0.11	0.14	0.28	0.27	0.29	0.13
Si	14.21	14.12	15.09	15	13.09	14.68
P	н.о.	0.46	0.16	н.о.	0.41	0.09
Ca	0.08	0.1	0.09	0.07	н.о.	0.03
Fe	0.26	0.24	0.15	0.18	0.96	0.24
Zn	48.57	47.15	53.38	47.41	54.57	49.45
O	29.01	29.05	31.46	31.52	27.64	30.93
Сумма	99.24	99.25	98.73	103.16	102.82	99.71
Формула из расчета на 7 атомов						
Mg	0.60	0.67	0.38	0.69	0.24	0.59
Al	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Si	1.05	1.04	1.07	1.04	1.03	1.04
P	–	0.03	0.01	–	0.03	0.01
Ca	–	0.01	–	–	–	–
Fe	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01
Zn	1.55	1.49	1.62	1.41	1.84	1.50
O	3.78	3.75	3.90	3.83	3.80	3.84

Примечание. н.о. – не обнаружено.

Ганит(?) с идеальной формулой  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$  представлен изометричными образованиями, размером до 10 мкм (см. рис. 5а, табл. 3).

Образец 245-3а (интервал 18–20 см) представляет собой биогенный карбонатный осадок, пропитанный гидроксидами железа, с обломками нерудных минералов (рис. 6а).

Установлены сульфиды – изокубанит  $\text{Cu}_{0.97-1}\text{Fe}_{1.97-1.99}\text{S}_{3.01-3.03}$  и пирит  $\text{FeS}_{1.89}$ . Изокубанит замещается оксидом (гидроксидом?) железа, предположительно, гётитом (см. рис. 6б). В изокубаните наблюдается примесь кобальта, никеля. Пирит образует скопления до 80 мкм мелких кристаллов изометричной формы, замещающиеся оксидом (гидроксидом?) железа (см. рис. 6в). Оксиды (гидроксиды?) железа образуют крупные скопления, размером более 100 мкм.

Встречаются зерна атакамита  $\text{Cu}_{1.9-2}(\text{O}_{3.07-2.95}\text{H})\text{Cl}_{0.97-1.03}$ , развивающиеся в пустотах (см. рис. 6а).

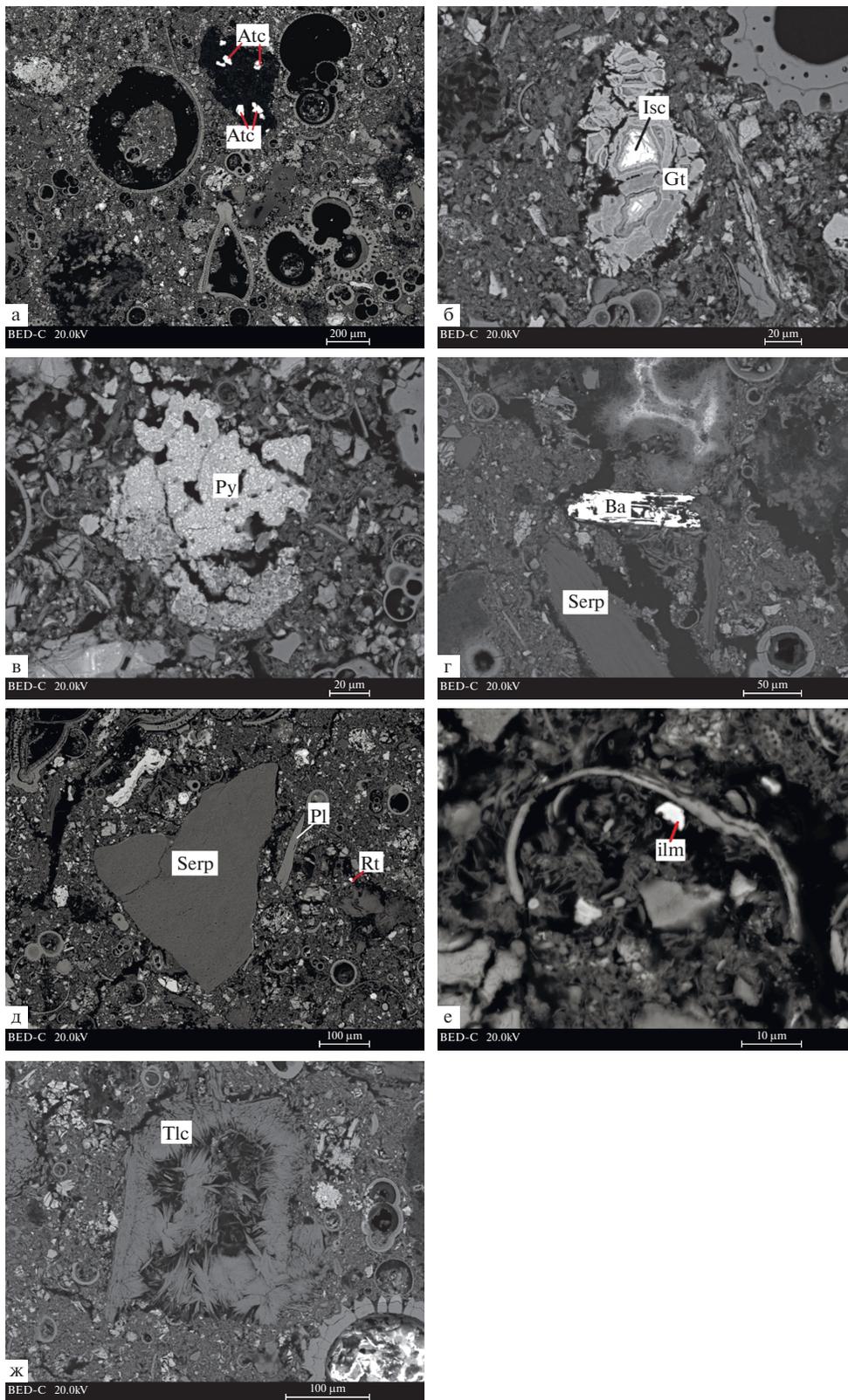
Барит  $\text{BaSO}_4$  образует идиоморфные кристаллы размером около 50 мкм (см. рис. 6г).

Эдафогенный материал представлен обломками серпентина (до 1 мм), плагиоклаза (до 200 мкм), рутила (см. рис. 6д) и ильменита (см. рис. 6е) (до 10 мкм). По обломкам серпентинизированного перидотита развивается тальк (см. рис. 6ж).

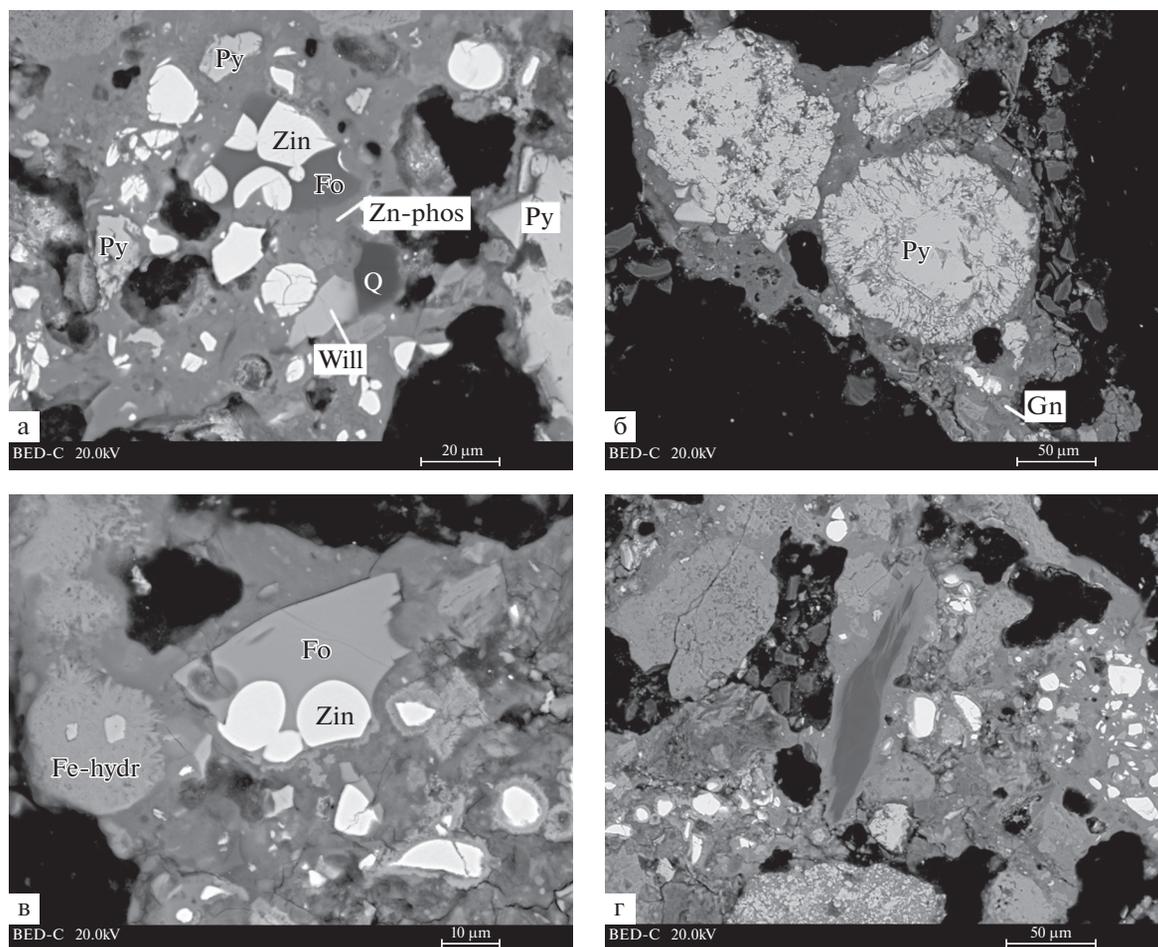
**Таблица 3.** Химический состав ганита(?)  $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{Al}_2\text{O}_4$  из рудоносных осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа		
	245-3_12	245-3_13	245-6_05
Mg	3.84	5.22	2.95
Al	27.75	27.65	29.07
Si	0.54	1.35	0.42
P	н.о.	н.о.	2.07
Fe	1.98	1.78	1.21
Zn	30.23	29.19	30.03
O	31.75	34.53	36.16
Сумма	96.17	99.76	101.91
Формула в расчете на 7 атомов			
Mg	0.30	0.38	0.21
Al	1.95	1.83	1.87
Si	0.04	0.09	0.03
P	–	–	0.12
Fe	0.07	0.06	0.04
Zn	0.88	0.80	0.80
O	3.77	3.85	3.93

Примечание. н.о. – не обнаружено.



**Рис. 6.** Фотографии шлифов рудоносных осадков в отраженных электронах. Образец 245-3а. Интервал 18–20 см. а – обзорная фотография кокколит-фораминиферового осадка с включениями атакамита (Atc); б – изокубанит (Isc) и гётит (Gh), замещающий его; в – пирит (Py) (более светлые зерна) в массе оксида (гидроксида?) железа; г – кристалл барита (Ba) и обломок серпентина (Serp); д – обломки эдафогенного материала, представленного серпентином (Serp), плагиоклазом (Pl), рутилом (Rt); е – мелкое зерно ильменита (ilm); ж – тальк (Tlc).



**Рис. 7.** Фотографии шлифов рудоносных осадков в отраженных электронах. Образец 245-6. Интервал 35–38 см. а – сростание цинкита (Zin) и цинкосодежащего форстерита (Fo), виллемит (Will), зерно кварца (Q), фосфат цинка с примесями (Zn-phos), крупные выделения пирита (Py); б – округлые скопления пирита (Py) (по микроорганизмам?) и мелкие выделения ганита(?) (Gn); в – оксид (гидроксид?) железа (Fe-hydr) и сростание цинкита (Zin) и форстерита (Fo); г – обломок эдафогенного материала (темно-серое удлиненное зерно), замещающийся фосфатами цинка (серая область вокруг зерна).

Встречаются обломки разной степени оталькованности.

Образец 245-6 (интервал 35–38 см) представляет собой рудный осадок псаммитовой структуры, состоящий из изометричных и неправильной формы зерен. Здесь наблюдается уменьшение содержания оксидов (гидроксидов?) железа и преобладание сульфидов железа.

Наблюдается также заметная цинково-фосфатная минерализация (см. табл. 1, 2, 3), представленная следующими минералами.

Цинкит  $Zn_{0.93}Mg_{0.10}O_{0.95}$  заполняет поры в осадке(?) и формирует агрегаты с цинкосодежащим форстеритом ( $Mg_{1.65}Zn_{0.37}SiO_{3.89}$  (Zn 15.75 мас. %) (рис. 7а).

Виллемит с идеальной формулой  $Zn_2SiO_4$  представлен кристаллами неправильной формы (см. рис. 7а).

Ганит(?) с идеальной формулой  $ZnAl_2O_4$  представлен скоплениями мелких кристаллов (см. рис. 7б).

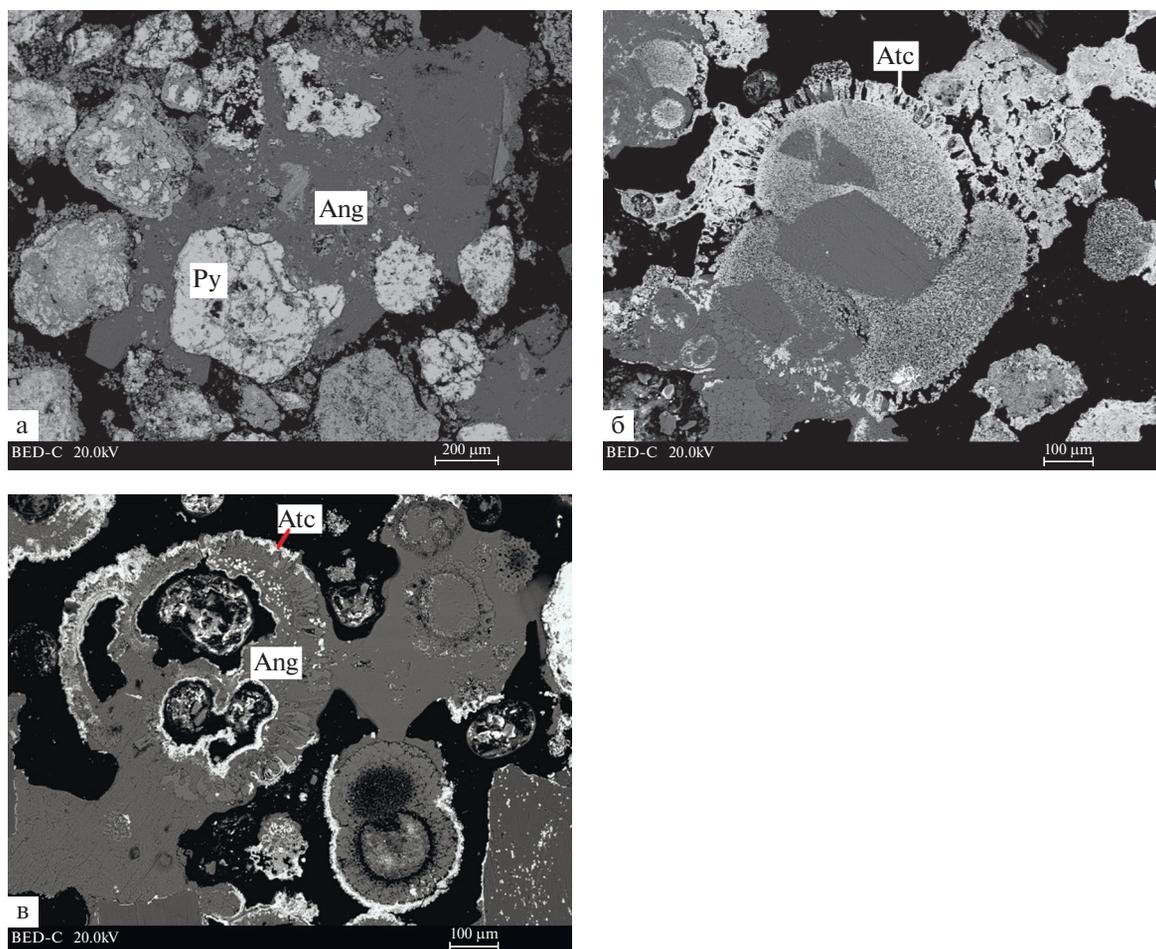
Сульфиды железа представлены пиритом, образующим крупные (до 100 мкм) скопления округлой и неправильной формы (см. рис. 7б).

Пространство между зернами заполнено фазой с составом (%): MgO 2.05,  $Al_2O_3$  5.3,  $SiO_2$  0.92,  $P_2O_5$  44.21, FeO 0.98, ZnO 35.93 (сумма 90.4) и, возможно, представляет собой фосфат цинка с примесями (см. рис. 7а).

Оксиды (гидроксиды?) железа образуют округлые скопления, размером около 10 мкм (см. рис. 7в).

Крупные обломки эдафогенного материала замещаются фосфатами цинка (см. рис. 7г).

Образец 245-9 (интервал 48–50 см) представляет собой рудный осадок псаммитовой структу-



**Рис. 8.** Фотографии шлифов рудоносных осадков в отраженных электронах. Образец 245-9. Интервал 48–50 см. а – скопления пирита (Py) и ангидрита (гипса?) (Ang) с реликтами биоморфной структуры; б – каймы атакамита (Atc), заместившего кальцитовый скелет раковины; в – скелеты раковин, замещенные ангидритом (гипсом?) (Ang) и обрастающие атакамитом (светлые каймы) (Atc).

ры, практически без фрагментов карбонатных осадков, с реликтами фауны, замещенной гидротермальными минералами.

Сульфиды представлены пиритом, формирующим крупные выделения округлой формы. Пространство между скоплениями пирита заполнено ангидритом (гипсом?) (рис. 8а).

Оставшиеся скелеты раковин замещаются ангидритом (гипсом?) и обрастают каймами атакамита (см. рис. 8б, в).

Эдафогенный материал представлен биотитом.

#### *Результаты рентгенофазового анализа*

Рентгенофазовый анализ тяжелой фракции образца 245-3 (интервал 18–20 см) позволил идентифицировать редко встречающиеся фосфаты цинка. Основанием для этого послужили данные элементного энерго-дисперсионного анализа и наличие на дифрактограммах изученной

фракции слабых рефлексов, совпадающих с главными отражениями парагопеита  $Zn_3(PO_4) \cdot 4H_2O$  (рис. 9), тарбуттита  $Zn_2(PO_4)OH$  и спенсерита  $Zn_2(OH)(PO_4)_2(H_2O)_3$ , что позволяет предположить присутствие этих минералов в образце в количествах, близких к порогу обнаружения.

Диагностика проводилась сопоставлением экспериментальных межплоскостных расстояний тарбуттита (6.13, 3.70, 3.27, 2.98, 2.88, 2.05 Å), спенсерита (9.39, 4.63, 4.62, 3.52 Å), парагопеита (5.82, 4.41, 2.99, 2.91 Å) с эталонными линиями межплоскостных расстояний из базы данных ICDD (International Centre for Diffraction Data, номера PDF-2 00-012-0300, 01-073-0185, 00-039-1352).

#### *Результаты исследования спектров комбинационного рассеяния*

Цинкит идентифицирован методом спектроскопии комбинационного рассеяния по линиям

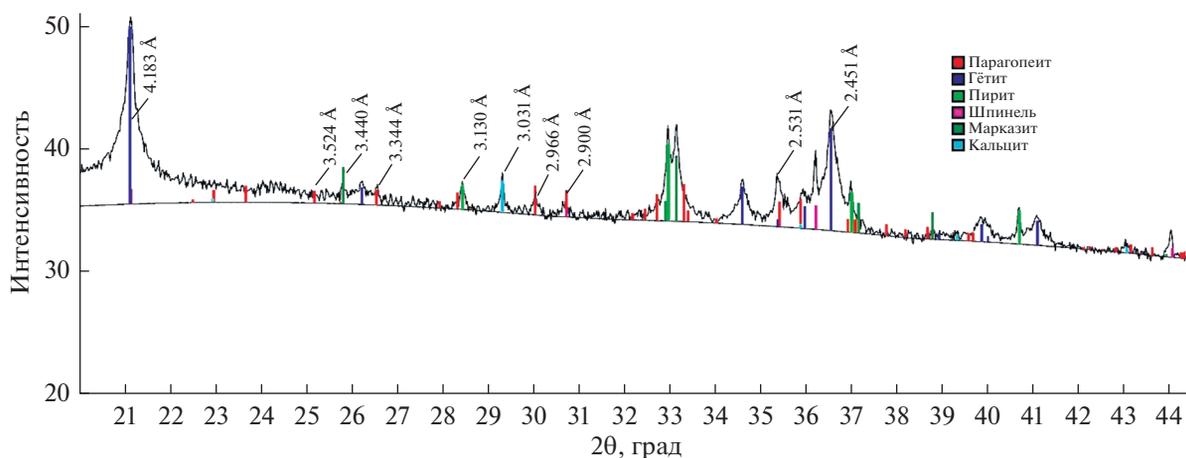


Рис. 9. Основные рефлексы парагениита (5.82, 4.41, 3.35, 2.99, 2.91 Å) на дифрактограмме тяжелой фракции (порошок) образца осадков со станции 37L245g.

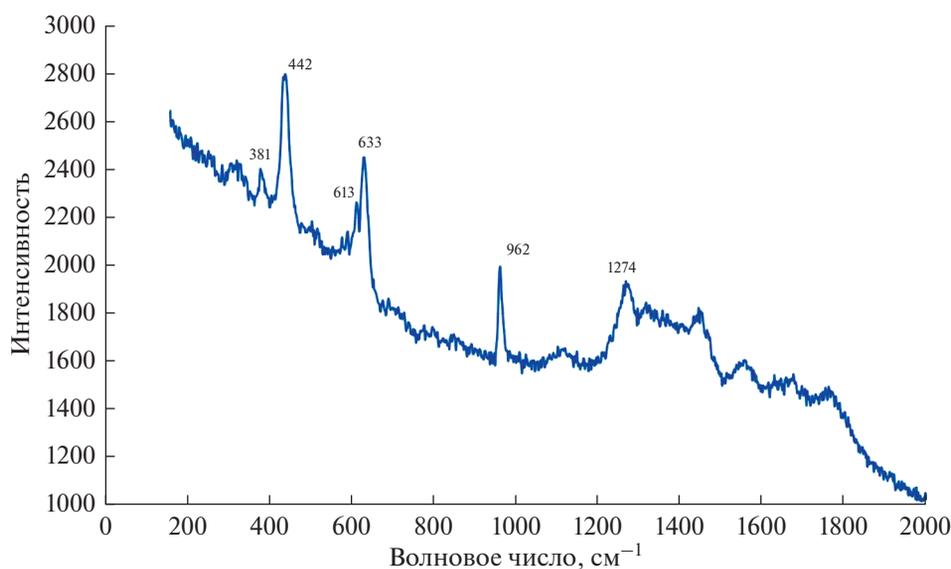


Рис. 10. Спектр комбинационного рассеяния цинкита с диагностическими линиями первого и второго порядка из рудоносных осадков гидротермального узла Победа. Длина волны лазера – 532 нм.

первого порядка: 442 и 633 ( $\text{см}^{-1}$ ) и второго порядка 381, 613, 962, 1274 ( $\text{см}^{-1}$ ) [Виноградов и др., 1977] (рис. 10).

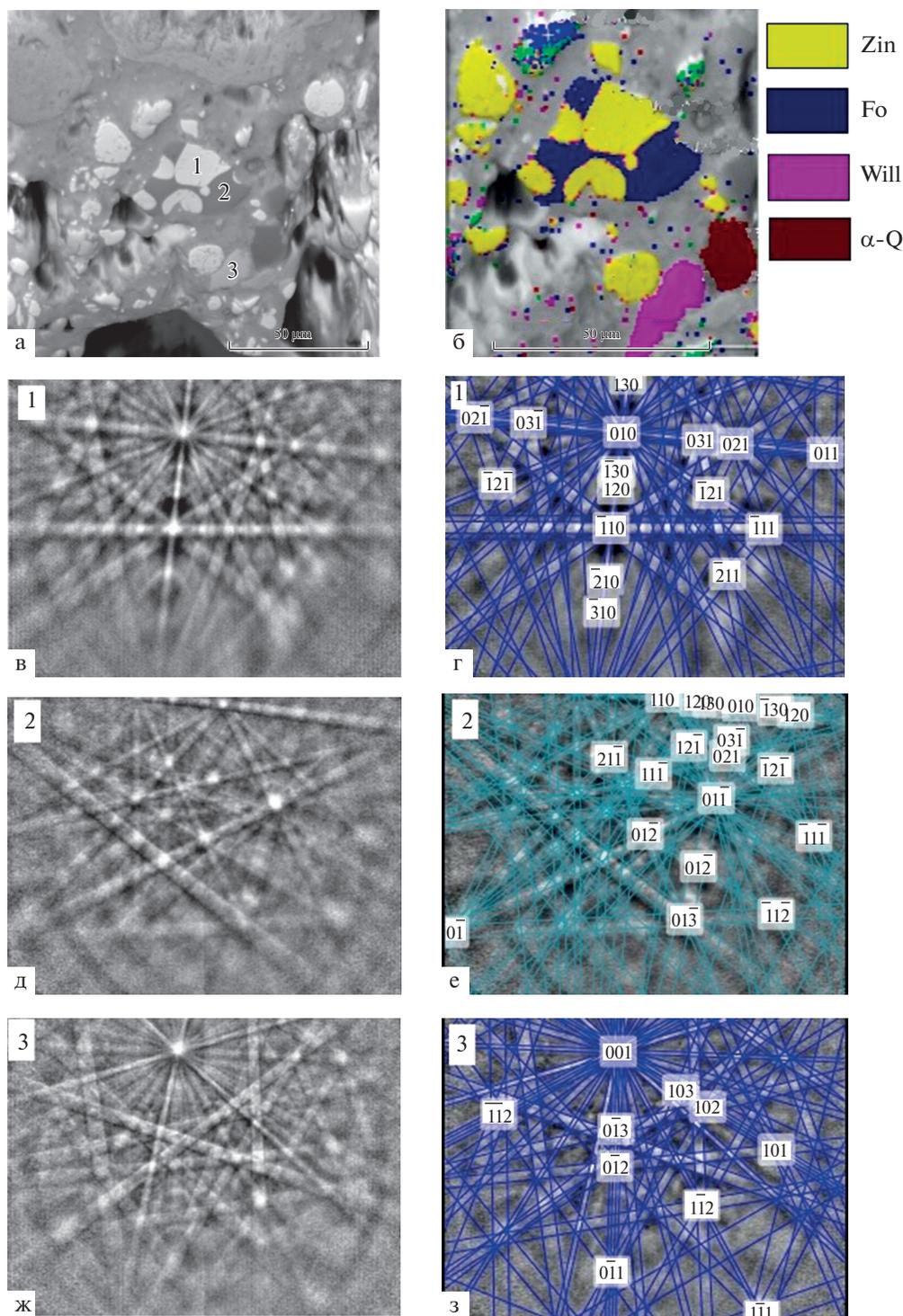
#### *Результаты анализа дифракции отраженных электронов*

Диагностика методом дифракции отраженных электронов была затруднена тем, что добиться идеально ровной поверхности из-за хрупкости образца не удалось.

Линии Кикучи были получены для следующих фаз: цинкит, виллемит, форстерит (рис. 11).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

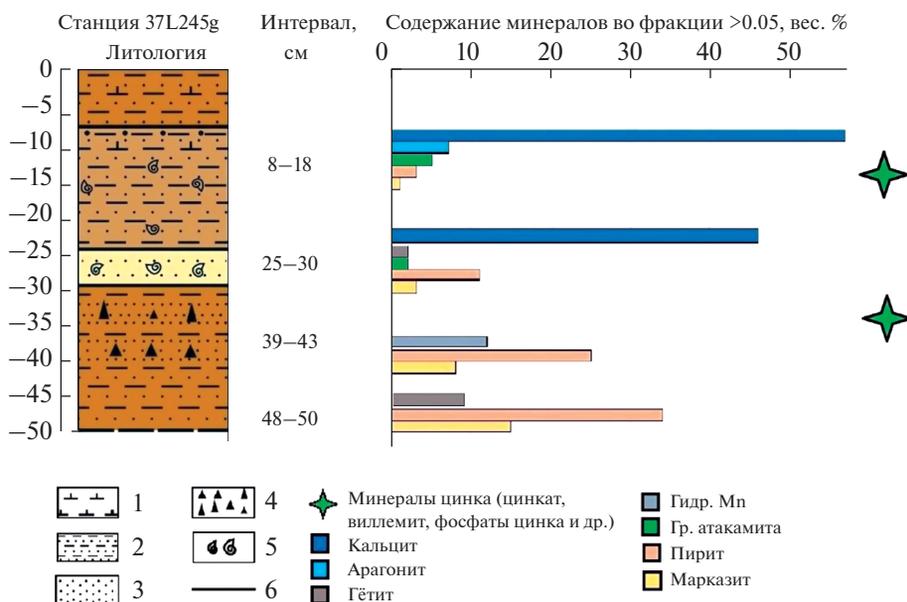
В колонке 37L245g сверху вниз по разрезу наблюдается смена существенно карбонатно-атакамитового парагенезиса на сульфидный, в сочетании с оксидным (присутствие гидроксидов железа и марганца, оксидов и фосфатов цинка). В нижней части разреза сульфидный парагенезис (пирит и марказит) становится преобладающим (рис. 12). Пирит формирует округлые выделения и образует вместе с ангидритом, замещающим раковины, биоморфную структуру. По всему разрезу колонки в значительных количествах присутствует эдафогенный материал, представленный серпентином, тальком, хлоритом, биотитом и др. В обломках пород нередко присутствуют прожил-



**Рис. 11.** Картины Кикучи идентифицированных минералов цинка в осадках станции 37L245g, интервал 35–38 см. а – микрофотография шлифа в отраженных электронах (цифрами обозначены минеральные фазы цинка); б – карта распределения фаз цинкита (Zin), форстерита (Fo), виллемита (Will), кварца ( $\alpha$ -Q). Картины дифракции с обозначением индексов кристаллографических плоскостей: в, г – цинкита; д, е – форстерита; ж, з – виллемита.

ки гидроксидов железа. В верхней части колонки встречаются единичные зерна сульфидов – изокубанита, пирротина, и кристаллики барита.

Цинковая минерализация установлена в двух горизонтах колонки 37L245g: 14–18 см и 35–38 см (см. рис. 12). Она представлена редкими минера-



**Рис. 12.** Характер распределения биогенного кальцита, оксидов и сульфидов железа, минералов цинка в колонке осадков ст. 37L245g (разрез колонки, по [Бельтнев, 2016]). 1–3 – литология: 1 – фораминифер-кокколитовый ил, 2 – пелит с примесью песчаной фракции, 3 – песок; 4, 5 – включения: 4 – включения фрагментов сульфидных руд, 5 – детрит птеропод; 6 – граница между слоями.

лами (оксидом, фосфатами, силикатом цинка), не характерными для руд и осадков Мирового океана, в которых цинковая минерализация представлена обычно сульфидами.

Э.П. Николаевой [1968] описан цинкит  $ZnO$ , который является продуктом окисления металлического цинка и клейофана, и образуется в окислительной слабощелочной обстановке путем осаждения из водных растворов, выщелачивающих ряд элементов. Цинкит обнаружен в донных осадках Тихого океана вблизи зоны Кларион, в ассоциации с оксидами и гидроксидами железа и марганца [Штеренберг, Воронин, 1990]. Ассоциация цинкита с оксидами (гидроксидами) железа наблюдается и в колонке 37L245g.

Особенностью гидротермального узла Победа является повышенное относительно фонового (сотые доли %) содержание фосфора в осадках – до 0.1–0.4% [Габлина и др., 2021]. Вероятно, с этим связано присутствие фосфатов в минеральном составе осадков. Фосфаты имеют сложный состав: это могут быть фосфаты самого цинка, цинка и кальция, цинка и железа. Источником фосфора большинство авторов считают биогенный материал отложений и/или обогащенную им морскую воду, однако установленная нами связь  $P$  с  $Zn$  и рост его содержания вниз по разрезу осадков может быть признаком поступления фосфора, как и металлов, с гидротермальными флюидами из субстрата. Представления о поступлении фосфора с поствулканическими гидротермальными растворами при формировании

фосфоритов обосновывает М.И. Липкина [1998], указывая на повышенные содержания  $P$  в базальтах. Обогащение  $P$  (до 1.56%) отмечается в толеитовых базальтах тихоокеанских гайотов [Волохин, 1995]. Предполагается, что базальты служили источником фосфора, фтора и других элементов, которые выщелачивались из пород разогретой морской водой и могли обогащать железомарганцевые корки. Повышенные концентрации  $P$  (0.45%) в нижних горизонтах донных осадков отмечены в Ангольской котловине [Дубинин и др., 2013]. Породы, подстилающие осадки в районе гидротермального узла Победа представлены в основном серпентинизированными габбро-перидотитами, содержание  $P$  в которых в среднем не превышает 0.05%. И лишь в одной пробе габброидов, взятой за пределами рудного поля Победа-1 (ст. 37L248g), оно составляет 0.92% [Бельтнев и др., 2016]. Возможно, низкие содержания  $P$  в породах субстрата в зоне гидротермальной активности (рудные поля узла Победа) обусловлены его выщелачиванием в процессе серпентинизации. На повышенные содержания  $P$  в основных (в среднем 0.14%) и средних (в среднем 0.16%) породах указывал А.П. Виноградов [1955, 1962]. Известно также, что  $P$ , как и цветные металлы, подвижен в кислой обстановке [Глаголева, 1959; Емельянов, Романкевич, 1979], которая может формироваться в породах под воздействием гидротермальных растворов.

Фосфаты цинка колонки 37L245g участвуют в замещении раковин, эдафогенного материала,

заполняют пространство между крупными (более 50 мкм) частицами и служат матрицей, в которой находятся зерна других цинковых минералов. Форма выделения этих минералов свидетельствует об их метасоматическом образовании.

Виллемит встречается в широком поле низкотемпературных обстановок в качестве вторичного минерала по сульфиду цинка и может кристаллизоваться при температуре от 25°C до 300°C в ассоциации с цинкитом [Brugger, 2003]. В этой же работе показано образование виллемита и цинкита в результате гидротермальных процессов в количествах, достаточных для формирования месторождения. В колонке 37L245g виллемит располагается в матрице из фосфатов цинка в виде отдельных мелких зерен и сростаний с силикатом натрия и цинка. Выделение виллемита по краям силикатного обломка в этих сростаниях (см. рис. 5б) может свидетельствовать о замещении виллемитом силикатных обломков (фрагментов субстрата). Ранее замещающийся гидроксидами железа виллемит был встречен в железомарганцевых корках гидротермального поля Ашадзе-2 (САХ) [Мусатов, 2021].

Примесь цинка в форстерите достаточно редкое явление [Власов, 2010]. В горизонтах колонки 37L245g форстерит образует сростания с цинкитом. Возможно, примесь цинка объясняется тем, что область генерации характеристического рентгеновского излучения при измерении распространяется в том числе и на другие фазы.

Фаза, предположительно диагностированная нами как ганит, формирует отдельные зерна, размером до 10 мкм.

Рентгенофазовый анализ проб осадков ст. 37L245g позволил выявить минеральную зональность: сверху вниз по разрезу колонки резко сокращается содержание биогенного кальцита (от 57% до 0%), при этом существенно увеличивается содержание рудных минералов, среди которых преобладают сульфиды (пирит до 34%, марказит до 15%) [Габлина и др., 2021] (см. рис. 12). Такая зональность связана с физико-химической обстановкой: в нижней части колонки условия восстановительные (Eh до -110.3), в верхней – окислительные (Eh от +235) (см. рис. 3), и обусловлена воздействием восстановительных металлоносных гидротермальных растворов, поступающих из субстрата, на пропитанные морской водой осадки. Влияние гидротермальных растворов на осадки также подтверждается повышенной кислотностью поровых вод (pH <7.5) в нижних горизонтах осадка относительно морской воды (pH 7.5–8.4, по [Park, 1966]). Такие значения pH не характерны для фоновых осадков и обычны для рудоносных осадков в зонах гидротермальной активности [Габлина и др., 2012, 2018]. При этом происходит растворение биогенного кальцита ра-

ковин микроорганизмов и замещение их оксидами Fe, Mn, пиритом и ангидритом (см. рис. 8). Отложение цинка в форме фосфатов, оксидов и других минералов происходит в средней части разреза, в зоне взаимодействия гидротермальных растворов и морской воды, пропитывающей осадки и создающей в них окислительную, щелочную обстановку, благоприятную для осаждения оксидов, силикатов и фосфатов цинка. Возможно, существенную роль в создании геохимического барьера на пути продвижения металлоносных кислых восстановительных гидротермальных потоков, поступающих снизу, мог сыграть прослой птероподовых песков (горизонт 25–30 см), насыщенный морской водой и отличающийся повышенными значениями Eh и pH (см. рис. 3).

Со временем при снижении гидротермальной активности увеличивалось влияние морской воды на осадки, что приводило к замещению сульфидов оксидами по всей толще осадков. Выводы о влиянии на осадки гидротермальных растворов, поступающих из субстрата, подтверждаются возрастными соотношениями, свидетельствующими о более раннем отложении нижних горизонтов осадков относительно начала гидротермальной активности, приводившей к рудообразованию. Возраст осадков, по данным радиоуглеродного анализа, от 5–31 тыс. лет и до настоящего времени [Бич, 2017; Бич, Петров, 2018], а возраст руд поля Победа-2, т.е. периодов активной гидротермальной деятельности, по результатам датирования уран-ториевым методом четырех образцов ст. 37L107d составляет (5.1 ± 0.2)–(11.2 ± 0.4) тыс. лет [Габлина и др., 2018]. Один образец руды, представленный массивными мелкокристаллическими пиритовыми рудами, имеет возраст (134.5 ± 11.4)/10.1 тыс. лет. Следовательно, наряду с новообразованными гидротермальными минералами (пиритом и ангидритом), в базальном горизонте осадков могли присутствовать и продукты разрушения ранее образованных сульфидных руд, подвергшихся гальмиролизу (замещению пирита гидроксидами железа). Однако, таких обломков в рудных осадках ст. 37L245g мы не наблюдали. Отмечались лишь обломки пород субстрата с прожилками гидроксидов железа. Преобладают структуры замещения гидротермальными минералами карбонатных раковин, что свидетельствует о решающей роли гидротермально-метасоматических процессов при формировании рудоносных осадков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описаны редкие минералы цинка (фосфаты цинка, цинкит, виллемит, ганит(?), цинкодержатель форстерит), большая часть которых впервые установлена в донных осадках Срединно-Атлантического хребта. С помощью электрон-

но-зондовой микроскопии и структурно-чувствительных методов идентифицированы фосфаты цинка (тарбуттит, спенсерит, парагопеит), цинкит, виллемит и цинксодержащий форстерит. Показаны морфология, парагенетические ассоциации и характер распределения этих минералов в осадках колонки 37L245g.

2. Установлено, что редкие минералы цинка концентрируются в средней части колонки. Высказано предположение, что их осаждение происходило в зоне взаимодействия гидротермальных растворов, поступающих в осадки из подстилающих магматических пород, и морской воды, насыщающей осадки. Влияние на создание физико-химических условий, благоприятных для формирования описанных минеральных ассоциаций (повышенные Eh и pH), вероятно, мог оказать прослой птероподовых песков, обогащенный морской водой.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории электронографии Института кристаллографии им. А.В. Шубникова (ФНИЦ “Кристаллографии и фотоники”) РАН за помощь в подготовке образцов для проведения дифракционных исследований; Е.А. Власову – за ценные советы и консультации и М.Ф. Вигасиной – за помощь в интерпретации результатов спектроскопии комбинационного рассеяния; программе развития МГУ – за возможность использования электронного микроскопа Jeol-IT50 с энергодисперсионным спектрометром X-Max-p.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (ГИН РАН, ИО РАН № FMWE-2021-0006).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бельтнев В.Е., Рождественская И.И., Самсонов И.К. и др.* Поисковые работы на площади Российского разведочного района в Атлантическом океане с оценкой прогнозных ресурсов ГПС категории P<sub>2</sub> и P<sub>3</sub> в блоках 31–45 // Отчет 37-го рейса НИС “Профессор Логачев”. М.: АО ПМГРЭ, 2016.

*Бич А.С.* Металлоносные осадки рудного узла Победа (Срединно-Атлантический хребет, 17°08' с.ш.) // Новое в познании процессов рудообразования // Материалы Шестой молодежной научно-практической конференции, Москва, 28 ноября–02 декабря 2016 г. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 62–65.

*Бич А.С., Петров А.Ю.* Изучение металлоносных осадков для реконструкции процессов гидротермального рудообразования (на примере рудного узла “Победа”, САХ) // Металлогения древних и современных океанов. Вулканизм и рудообразование / Отв. ред. В.В. Мас-

ленников, И.Ю. Мелекесцева. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 89–93.

*Бострём К., Фаркуарсон Б., Эйл У.* Подводные горячие растворы как один из источников вещества осадков активных подводных хребтов // Т. IV. Книга 1. Осадочные процессы // 1 Международный геохимический конгресс, Москва, 20–25 июля 1971 г. М.: ГЕОХИ им. В.И. Вернадского, 1973. С. 437–459.

*Виноградов А.П.* Закономерности распределения химических элементов в земной коре. М.: Изд-во МГУ, 1955. 16 с.

*Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

*Виноградов Е.А., Мельник И.Н., Цуркан А.Е., Кичерман Л.И.* Комбинационное рассеяние света в монокристаллах ZnO // Журнал прикладной спектроскопии. 1977. Т. 26. № 6. С. 1059–1062.

*Власов Е.А.* Дистанционный учебный курс “Минералогия”, Ч. 2, лекция 2. М.: Геологический факультет МГУ, 2010. Электронный ресурс: URL: <https://teach-in.ru/lecture/2020-02-14-Vlasov-E> (дата обращения: 27.04.2022)

*Волохин Ю.Г., Мельников М.Е., Школьник Э.Л. и др.* Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность. М.: Наука, 1995. 368 с.

*Габлина И.Ф., Попова Е.А., Садчикова Т.А. и др.* Гидротермальные изменения современных органических осадков поля Ашадзе-1 (САХ, 13°с.ш.) // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 499–503.

*Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Наркевский Е.В. и др.* Влияние гидротермально-метасоматических процессов на формирование современных сульфидных руд в карбонатных донных осадках Срединно-Атлантического хребта (19–20° с.ш.) // Литология и полез. ископаемые. 2017. № 5. С. 387–408.

*Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Лайба А.А., Наркевский Е.В. и др.* Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа (17°07'–17°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полез. ископаемые. 2018. № 6. С. 475–500.

*Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Попова Е.А. и др.* Минеральный состав и геохимическая зональность донных осадков гидротермального узла Победа (17°07.45' с.ш.–17°08.7' с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полез. ископаемые. 2021. № 2. С. 101–121.

*Глаголева М.А.* Формы миграции элементов в речных водах // К познанию диагенеза осадков / Отв. ред. акад. Н.М. Страхов. М.: АН СССР, 1959. С. 5–28.

*Дубинин А.В., Свальнов В.Н., Бережная Е.Д. и др.* Геохимия редких и рассеянных элементов в осадках и марганцевых микроконкрециях Ангольской котловины // Литология и полез. ископаемые. 2013. № 3. С. 191–214.

*Емельянов Е.М., Романкевич Е.А.* Геохимия Атлантического океана. Органическое вещество и фосфор. М.: Наука, 1979. 220 с.

*Липкина М.И.* Фосфатная и сопутствующая минерализация в магматических породах подводного вулкана Ченцова (Японское море) // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 3. С. 81–93.

*Мусатов А.Е., Шиловских В.В., Маковиз А.М., Сергеева И.А.* Особенности минерального состава гидротермальных корок поля Ашадзе-2 (Срединно-Атлантический хре-

бет) // Сборник тезисов VII Молодежной конференции “Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана” (9–11 июня 2021 г., г. Санкт-Петербург). СПб., 2021. С. 105–106.

Николаева Э.П. О колломорфном цинкит из ангрениских углей // Докл. АН УзССР. 1968. № 2. С. 44–45.

Розанова Т.В. Осадки рифтовых зон срединных хребтов Индийского океана. История мирового океана / Ред. Л.А. Зенкевич. М.: Наука, 1971. С. 174–195.

Русаков В.Ю., Шилов В.В., Рыженко Б.Н., Габлина И.Ф., Рощина И.А., Кузьмина Т.Г., Кононкова Н.Н., Добрецова И.Г. Минералого-геохимическая зональность осадков гидротермального узла “Семенов” (13°31′–13°30′ с.ш. Срединно-Атлантический хребет) // Геохимия. 2013. № 8. С. 717–742.

Штеренберг Л.Е., Воронин Б.И. Обломки цинкита (ZnO) в осадках станции 655 (северо-восток Тихого океана) // Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1990. № 59. С. 129–134.

Brugger J. Formation of willemite in hydrothermal environments // Economic Geology. 2003. V. 98. P. 819–835.

Bonatti E. Deep sea authigenic calcite and dolomite // Science. 1966. № 153. P. 534–537.

Bonatti E., Fisher D., Joensuu O., Rydell H. Postdepositional mobility of some transition elements, phosphorus, uranium, and thorium in deep-sea sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1971. V. 35. P. 189–201.

Boström K., Peterson M.N.F., Joensuu O., Fisher D.E. Aluminium-poor ferromanganoan sediments on active oceanic ridges // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 3261–3270.

Boström K., Fischer D.E. Volcanogen uranium, vanadium and iron in Indian Ocean sediments // Earth Planet. Sci. Lett. 1971. V. 11. P. 95–98.

Horowitz A., David S. Cronan. The geochemistry of basal sediments from the North Atlantic Ocean // Marine Geology. 1976. V. 20. P. 205–228.

Park K. Deep-Sea pH // Science. 1966. V. 154. P. 1540–1542.

Skornyakova I.S. Dispersed iron and manganese in Pacific Ocean sediments // Internat. Geol. Rev. 1964. V. 7(12). P. 2161–2174.

## Mineral Phases of Zinc in Ore-Bearing Sediments of the Pobeda Hydrothermal Cluster (17°07.45′–17°08.7′ n. MAR)

A. D. Lyutkevich<sup>1</sup>\*, I. F. Gablina<sup>1</sup>, O. M. Dara<sup>2</sup>, V. O. Yapaskurt<sup>3</sup>, V. D. Shcherbakov<sup>3</sup>, P. A. Somov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky prosp., 36, Moscow, 117997 Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

<sup>4</sup>HSM lab, Center for Energy Science and Technology, Skoltech, Moscow, 121205 Russia

\*e-mail: nastya.lyutkevich@mail.ru

The work is devoted to the study of the mineral composition of ore-bearing sediments of the Pobeda hydrothermal unit (MAR) and is a continuation of previous studies [Gablina et al., 2021]. Rare zinc minerals (zinc phosphates, zincite, willemite, gahnite(?), and zinc-bearing forsterite) were described, most of which were first established in the bottom sediments of the Mid-Atlantic Ridge. The studies were carried out by a complex of methods: scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy, and backscattered electron diffractometry.

**Keywords:** Mid-Atlantic ridge, carbonate metal-bearing and ore-bearing bottom sediments, mineral composition, rare zinc minerals.