

УДК 551

МИНЕРАЛЫ-ИНДИКАТОРЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО УЗЛА ПОБЕДА (17°44.9'–17°07.6' с.ш. САХ)

© 2023 г. А. Д. Люткевич^а, *, И. Ф. Габлина^а, Е. В. Наркевский^б,
И. Г. Добрецова^б, А. А. Киселев^а, Н. В. Горькова^а

^аГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^бАкционерное общество “Полярная морская геологоразведочная экспедиция”,
ул. Победы, 24, г. Ломоносов, Санкт-Петербург, 198412 Россия

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

Поступила в редакцию 20.01.2023 г.

После доработки 22.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Работа посвящена изучению рудных минералов поверхностного горизонта рудоносных осадков гидротермального узла Победа. Используются следующие методы: оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Установлено, что рудные минералы представлены обломками сульфидов меди и железа (изокубанитом, халькопиритом, пиритом), новообразованными гидроксидами железа и атакамитом. Кроме того, присутствует барит и эдафогенный материал в виде обломков оталькованных пород, иногда с включениями сульфидов. Выделены структурно-морфологические типы гидроксидов железа. На основании гидрофизических данных уточнено расположение предполагаемого активного гидротермального источника в районе рудопроявления Победа-3. Описан характер распределения изученных минералов в зависимости от расположения относительно активных гидротермальных источников. При удалении от источников отмечено уменьшение размеров и количества обломков гидротермальных минералов и эдафогенного материала, и усиление степени замещения сульфидов гидроксидами железа. Также при удалении от источника наблюдается уменьшение отношения Cu/Fe в химическом составе сульфидов меди и железа. В поверхностном горизонте колонки ст. 37L245g, установлена не идентифицированная фаза состава $Cu_{3,57-4,22}Fe_{1,71-2,19}S_{4,99-5,31}$ с включениями ламелей халькопирита.

Ключевые слова: Срединно-Атлантический хребет, гидротермальный узел Победа, карбонатные металлоносные и рудоносные донные осадки, минеральный состав, сульфиды меди и железа, гидроксиды железа.

DOI: 10.31857/S0024497X23700179, EDN: TMMFHF

Работа посвящена изучению минерального состава поверхностного горизонта металлоносных и рудоносных осадков гидротермального узла Победа, и характера распределения в нем рудных минералов в зависимости от расположения относительно активных гидротермальных источников. В зонах активной современной гидротермальной деятельности находятся станции 37L244g, 37L245g (поле Победа-2) и ст. 37L075k (поле Победа-1). В некотором удалении от активного источника поля Победа-1 (1.5 км) расположены станции 37L246g и 37L184k (рудопроявление Победа-3). Станция 37L215k находится в 69 км к северу от гидротермального узла Победа, за пределами зоны гидротермальной активности.

Сопоставление возраста осадков, определенного радиоуглеродным методом [Бич, 2017; Бич,

Петров, 2018], и этапов гидротермальной активности [Габлина и др., 2018; Kuznetsov et al., 2020] свидетельствует о совпадении времени формирования поверхностного горизонта с поздним этапом гидротермальной деятельности, продолжающейся до настоящего времени. Следовательно, в его составе могут присутствовать минеральные частицы, выпавшие из гидротермального плюма.

Металлоносные осадки, развитые в зонах современной гидротермальной активности срединно-океанических хребтов, описаны в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей [Металлоносные осадки ..., 1976; Лисицын, 1978; Metz et al., 1988; Лисицын и др., 1990; Mottl, McConachy, 1990; Гидротермальные ..., 1992; Feely et al., 1992; Гордеев и др., 1993; German et al., 1993; Mills, Elderfield, 1993; Rudnitsky, Elder-

field, 1993; Гурвич, 1998; Dias, Barriga, 2006; Gurvich, 2006; Русаков, 2007, 2009 и др.]. Основное внимание в них уделено осадкам, сформированным при выпадении рудных компонентов из плюма или при разрушении гидротермальных сульфидных построек. Оба эти типа по всему разрезу металлоносных осадков рассмотрены в работе [Kuksa et al., 2021] на примере гидротермального узла Победа. Поверхностный горизонт в ней изучен по колонкам осадков станций 37L075k (поле Победа-1), 37L244g (поле Победа-2) и 37L246g (рудопроявление Победа-3). Наши исследования вносят дополнительные данные по минеральному составу поверхностного горизонта осадков этого объекта и характеру его изменения при удалении от гидротермальных источников.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Рудный узел Победа был открыт в рейсе № 37 при проведении заверочных работ аномалий потенциала естественного поля (ЕП), зафиксированных в блоках 37 и 39 Российского разведочного района, выделенного России с целью разведки и дальнейшей эксплуатации Международным органом по морскому дну при ООН в северной приэкваториальной зоне (между 13° и 20°50' с.ш.) Срединно-Атлантического хребта (САХ). Рейс № 37 проводился ФГУНПП “Полярная морская геолого-разведочная экспедиция” в 2014–2015 гг. [Бельтнев и др., 2016]. Гидротермальный узел Победа расположен на восточном борту рифтовой долины, на крутом склоне горного массива, в интервале глубин 1950–3100 м. Рудный узел приурочен к габбро-перидотитовому комплексу и включает в себя гидротермальные рудные поля Победа-1, Победа-2 и рудопроявление Победа-3 (рис. 1). Участвующие в строении узла осадки представлены голоцен-верхнеплейстоценовыми карбонатными кокколлит-фораминиферовыми илами, иногда с включениями раковин птеропод и эдафогенного материала.

Поле Победа-1 расположено на глубине от 1950 до 2300 м и состоит из 3 рудных тел, представляющих собой холмы высотой до 10 (?) м, нередко с трубными комплексами на вершинах и плитообразным цоколем, покрытым бактериальными матами. Вокруг построек развиты рыхлые отложения (рудноносные осадки, рыхлые и брекчированные руды), пронизанные многочисленными каналами диффузных потоков [Бельтнев и др., 2016; Габлина и др., 2018]. Наряду с реликтовыми постройками, в пределах рудного поля выявлены признаки современной гидротермальной активности. По данным гидрофизических исследований в вертикальном распределении мутности на станции 37L198z (рудное тело II) прослеживаются черты гидротермального плюма: повышенные значения мутности 0.035–0.038 FTU в 60-метро-

вом слое, приподнятом на 200 м от дна, с максимумом 0.047 FTU на горизонте 1994 м. При выполнении расположенной рядом станции телегрейфера 37L196g, визуально наблюдались клубы дыма, что свидетельствует о наличии гидротермальной активности в этом районе.

Станция 37L075k (17°08.562' с.ш., 46°23.359' з.д., глубина 2208 м) расположена в пределах поля Победа-1, южнее рудного тела II, около 300 м от ст. 37L196g, 37L198z, где зафиксирована современная гидротермальная деятельность [Бельтнев и др., 2016].

Поле Победа-2 находится на расстоянии около 4 км к юго-западу от поля Победа-1 на глубине 2800–3100 м, контуры его не установлены. За центр рудного поля принимаются координаты – 17°07.45' с.ш., 46°24.5' з.д. По данным сонограмм профилографа ГБО “МАК-1М” мощность осадков на пологих склонах и во впадинах в районе рудного поля достигает 4–4.5 м. На гидрофизической станции 37L199z в придонных водах фиксируется 125-метровый слой, с повышенными значениями мутности 0.036–0.040 FTU, с максимумом 0.050 FTU на горизонте 2741 в 200 м от дна, что может свидетельствовать о существовании в пределах поля современной гидротермальной активности [Бельтнев и др., 2016]. Осадки рудного поля Победа-2 опробованы станциями телевизионного грейфера (ТВГ): 37L244g (17°07.371' с.ш., 46°24.706' з.д., глубина 2995 м), 37L245g (17°07.602' с.ш., 46°24.842' з.д., глубина 3106 м) вблизи гидрофизической станции 37L199z (см. рис. 1). На обеих станциях вскрыты металлоносные, рудоносные и рудные осадки.

Рудопроявление Победа-3 расположено в интервале глубин 2500–2700 м. За центр рудопоявления принимаются координаты – 17°08.3' с.ш., 46°24.2' з.д. На всех станциях КП (коробчатый пробоотборник) и станции ТВГ подняты рудосодержащие кокколлит-фораминиферовые и птероподовые осадки коричневого и коричневатобежевого цвета, пропитанные гидроксидами железа, с включениями зерен пирита, барита, иногда Fe–Mn корок, тонких прослоев рудных осадков. В работе [Kuksa et al., 2021] высказано предположение, что и в районе рудопоявления Победа-3, вблизи ст. 37L246g мог находиться гидротермальный источник.

Нами изучен поверхностный слой колонок со станций 37L246g (17°08.393' с.ш., 46°24.090' з.д., глубина 2556 м), и 37L184k (17°08.418' с.ш., 46°24.068' з.д., глубина 2544 м) (см. рис. 1, [Бельтнев и др., 2016]).

Фоновая станция 37L215k (17°44.899' с.ш., 46°24.428' з.д., глубина 3535 м) расположена в 69 км севернее гидротермального узла Победа в Российском разведочном блоке 33, на западном склоне горы 17°45' с.ш. на глубине 3535 м [Бельте-

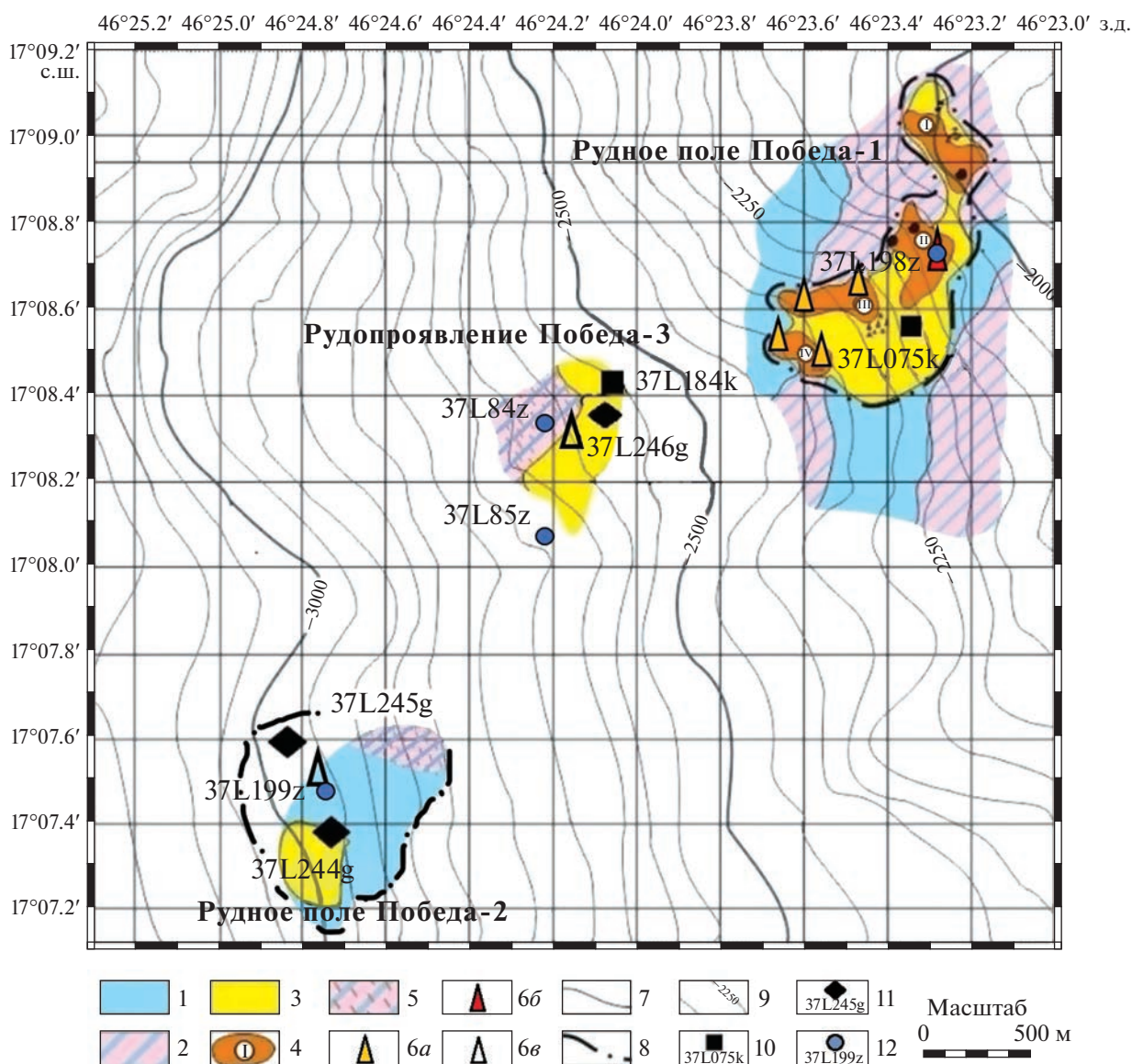


Рис. 1. Схема гидротермального узла Победа (по материалам [Бельтнев и др., 2016] с добавлениями).

1 – кокколит-фораминиферовые илы; 2 – магматические породы, частично покрытые карбонатными осадками; 3 – металлоносные осадки; 4 – рудные тела и их номера; 5 – гидротермально измененные породы; 6 – гидротермальные источники (*а* – не активные, *б* – активные, *в* – предполагаемые); 7 – геологические границы по данным телепрофилирования; 8 – границы рудного поля; 9 – изобаты; 10–12 – станции отбора проб и их номера: 10 – коробчатый пробоотборник (*k*); 11 – телегрейфер (*g*), 12 – гидрофизический зонд (*z*).

нев и др., 2016]. Осадки мощностью 110 см подняты коробчатым пробоотборником в ненарушенном состоянии. Они представлены однородными кокколит-фораминиферовыми илами бежевого и коричневатого-бежевого цвета алевропелитовой структуры (≤ 0.1 мм) с примесью песчаной фракции (0.1–2 мм). Песчаная фракция состоит из кальцитовых раковин планктонных и бентосных фораминифер хорошей сохранности и детрита птеропод, алевропелитовая представлена кокколитами и глинистыми минералами [Габлина и др., 2021].

Возраст осадков гидротермального узла Победа, определенный радиоуглеродным методом, датируется в пределах 31 829–5030 лет (поле Победа-1, ст. 37L075k) и 29550–10325 лет (рудопоявление Победа-3, ст. 37L246g) [Бич, 2017; Бич, Петров, 2018]. Формирование осадочной колонки 37L244g рудного поля Победа-2 охватывает возрастную интервал от ~76 т.л.н. до ~19.5 т.л.н. [Бельтнев и др., 2016]. По комплексу кокколитов, изученных в колонках станций 37L075k (Победа-1), 37L244g, 37L245g (Победа-2), 37L179k, 37L184k, 37L246g (Победа-3) возраст осадков со-

ответствует биостратиграфической зоне *Emiliania huxleyi* по схеме Гартнера [Хусид и др., 2018].

Возраст верхней части разреза, определенный по колонкам станций 37L075k (поле Победа-1) и 37L246g (Победа-3) находится в интервале от 22130 л.н., до настоящего времени. Промежуточные датировки возраста осадков верхней части составляют 10500 л.н., 8155 л.н. и 5030 л.н. [Бич, 2017; Бич, Петров, 2018]. Абсолютный возраст сульфидных руд поля Победа-2, определенный $^{230}\text{Th}/\text{U}$ методом по валовым пробам, колеблется в интервале 5.1 ± 0.2 – 11.2 ± 0.4 тыс. лет [Габлина и др., 2018], что вписывается в рамки возраста рудоносных осадков верхней части разреза и может свидетельствовать о их одновременном образовании. Определение возраста по мономинеральным образцам неизмененных сульфидов одной генерации, проведенное В. Кузнецовым с соавторами [Kuznetsov et al., 2020], позволило идентифицировать 3 периода гидротермальной активности: 1) 22.1 ± 1.2 , 2) 14.6 ± 0.7 и 3) 6.5 ± 0.3 до 0.27 ± 0.13 тыс. лет в пределах поля Победа-1 и: 1) 37.2 ± 8.1 , 2) 8.59 ± 0.41 и 3) 4.3 ± 0.7 тыс. лет в пределах поля Победа-2. Исходя из этого, можно предположить, что формирование поверхностного горизонта осадков происходило при участии минеральных частиц, выпадающих из гидротермального плюма в последний период гидротермальной активности, которая фиксируется в этом районе и в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб осадков с борта судна проводился с помощью коробчатого пробоотборника (k) и телегрейфера (g). Колонки осадков для дальнейшего исследования были отобраны И.Ф. Габлиной во время рейса. Изучение водной толщи (z) проводилось Е.В. Наркевским с применением зондирующего комплекса SBE 911 plus в составе погружаемого устройства CTD SBE 9 plus и бортового блока DU SBE 11 plus.

Нами были отобраны образцы осадков из верхних горизонтов (до 10 см) колонок, расположенных вблизи источников гидротермальной активности и на различном удалении от них. Отбор образцов в камеральных условиях проводился из колонок в высохшем состоянии, что не всегда позволяло точно установить интервал отбора. По удалению от гидротермального источника колонки можно расположить в следующем порядке: 37L245g и 37L244g (Победа-2) примерно в 200 м от предполагаемого гидротермального источника, 37L075k (Победа-1) около 300 м от установленного источника, 37L246g и 37L184k (Победа-3) приблизительно 1.5 км от установленного источника на поле Победа-1 и 37L215k, расположенная в 69 км севернее г/т узла Победа.

Во время рейса проводился шлихоминералогический анализ (исполнитель И.Г. Добрецова), для которого пробы отбирались из поверхностного слоя и забоя колонки. Под биноклем изучался минеральный состав тяжелой фракции промытой пробы (фракция 0.1–0.25 мм). Тяжелая фракция выделялась методом разделения в бромформе [Бельтнев и др., 2016].

Из отобранного материала верхних горизонтов колонок осадков приготовлено 10 прозрачно-полированных шлифов: из колонки 37L245g – 2 шлифа (образец 245-1, интервал 0–3 см); из колонки 37L244g – шлифы 244-1 (интервал 0–2 см) и 244-2 (интервал 2–5 см); из колонок 37L075k – 075-1 (интервал 0–2 см); 37L246g – 246-1 (интервал 0–2 см) и 246-2 (интервал 2–5 см); 37L184k – 184-1 (интервал 0–5 см) и 184-2 (интервал 2–10 см); 37L215k – 215-1 (интервал 0–10 см).

Шлифы предварительно изучены на оптическом микроскопе Axiolab фирмы Zeiss.

Изучение элементного состава минералов этих проб проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа “TESCAN VEGA 3” (“TESCAN”, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром “ULTIM MAX 40” (“Oxford Instrument”, Великобритания (аналитики Н.В. Горькова и А.А. Киселев, ГИН РАН). Для анализа всех элементов использовались К-серии эмиссионных линий; сравнительно простой химизм и отсутствие интерференции 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 10 ± 0.05 нА. Средняя скорость обработки данных составляла около 14 тыс. имп/с, а величина “мертвого” времени не превышала 40%. Экспозиция в каждом измерении нормализовалась по величине “живого” времени и составляла 105 с.

Перед проведением электронно-микроскопических и электронно-зондовых исследований поверхность образца была покрыта углеродной или золотой пленкой в вакуумном испарителе.

Обработка энергодисперсионных спектров проводилась с использованием ХРР-коррекции в программе “AZtec Advanced” (производство “Oxford Instruments”, Великобритания).

Для диагностики некоторых минералов дополнительно применялись методы спектроскопии комбинационного рассеяния и EBSD (исполнитель А.Д. Люткевич).

Таблица 1. Минеральный состав тяжелой фракции шлиховых проб поверхностного горизонта (%)

№ проб	Пироксен	Группа хромшпинелидов	Магнетит	Гидроксиды Fe	Гематит	Барит	Обломки пород	Пирит	Сульфиды Cu	Атакамит	Выход тяжелой фракции (мл)
37L245	1.9	–	4.0	73.6	–	1.0	–	0.2	–	19.3	0.1
37L244	зн.	–	5.0	87.3	–	0.5	–	2.3	–	5.0	0.1
37L075	5.0	5.9	2.4	68.0	2.5	1.6	9.6	зн.	зн.	5.0	0.1
37L246	6.7	6.7	4.5	67.5	–	зн.	0.5	14.3	–	–	0.05
37L184	4.8	9.5	0.3	79.8	зн.	1.0	4.8	–	–	–	0.1
37L215	–	зн.	–	зн.	–	зн.	–	зн.	зн.	–	<0.01

Примечание. Прочерк – не обнаружено. Исполнитель – И.Г. Добрецова [Бельтнев и др., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Шлихоминералогический анализ

Во всех колонках гидротермального узла Победа в тяжелой фракции поверхностного горизонта преобладают гидроксиды железа, составляющие от 68% (ст. 37L075k) до 87.3% (ст. 37L244g) тяжелой фракции. Кроме того, в зоне гидротермальной активности (гидротермальные поля Победа-1 и Победа-2) установлены атакамит (до 19.3%, ст. 37L245g), пирит (до 2.3%, ст. 37L244g), гематит (2.5%, ст. 37L075k), барит (0.5–1.5%), знаки халькопирита и сульфидов меди. На удалении от гидротермальных источников (рудопоявление Победа-3) минералы-индикаторы гидротермальной деятельности в поверхностном горизонте колонки 37L184k представлены только гидроксидами железа (79.8%), баритом (1%) и знаками гематита, в колонке 37L246g, кроме того, установлены пирит (до 20%) и сульфиды меди (табл. 1).

Кроме гидротермальных минералов в поверхностном слое гидротермального узла Победа присутствуют обломки пород и породообразующих минералов: пироксена, магнетита, хромшпинели, оливина, амфибола. Максимальное их количество отмечается в тяжелой фракции осадков ст. 37L075k и 37L184k (см. табл. 1).

В поверхностном горизонте осадков за пределами зоны гидротермальной активности (ст. 37L215k) минералы-индикаторы (гидроксиды железа, сульфиды меди, барит), а также обломки пород, породообразующих и акцессорных минералов (пироксен, хромшпинель) отмечаются в виде единичных знаков (см. табл. 1).

Нашими предыдущими исследованиями осадков ст. 37L244g с использованием сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов во фракции >0.05 мм поверхностного горизонта установлены также минералы, не входящие в состав тя-

желой фракции: тальк (8%), серпентин (2%) и кварц (1%), хлорит и палыгорскит [Габлина и др., 2021].

Оптическая, сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ

Как показали исследования на оптическом и электронном микроскопах, большая часть гидроксидно-железистых зерен, установленных шлихоминералогическим анализом в поверхностном горизонте, содержит реликтовые включения сульфидных минералов. Сульфиды представлены преимущественно пиритом, халькопиритом, изокубанитом. Средний размер сульфидных зерен составляет 82.5 мкм (рис. 2). Большая часть зерен во всех колонках имеет размер от 15 до 160 мкм. В колонках 37L245g и 37L075k найдены несколько зерен большего размера: от 225 до 314 мкм и силикатные обломки размером ≥ 1500 мкм с вкраплениями сульфидов.

Поле Победа-2, станция 37L245g. В поверхностном горизонте (интервал 0–3 см) станции 37L245g среди рудных минералов преобладают гидроксиды железа, которые развиваются по сульфидам: изокубаниту, халькопириту, пириту (рис. 3а–в). Изокубанит и халькопирит представляют собой изометричные зерна с каймами гидроксидов железа (см. рис. 3а–3в). Изокубанит иногда присутствует в виде вкрапленников в силикатных обломках (рис. 4а). Он также замещается гидроксидами Fe, которые развиваются по трещинам и образуют тонкие каемки обрастания.

Пирит в верхнем горизонте осадков станции 37L245g имеет различную степень замещения: с тонкими каймами гидроксидов железа и полностью замещенные ими (см. рис. 3а, 3б). Составы изокубанита и пирита из поверхностного гори-

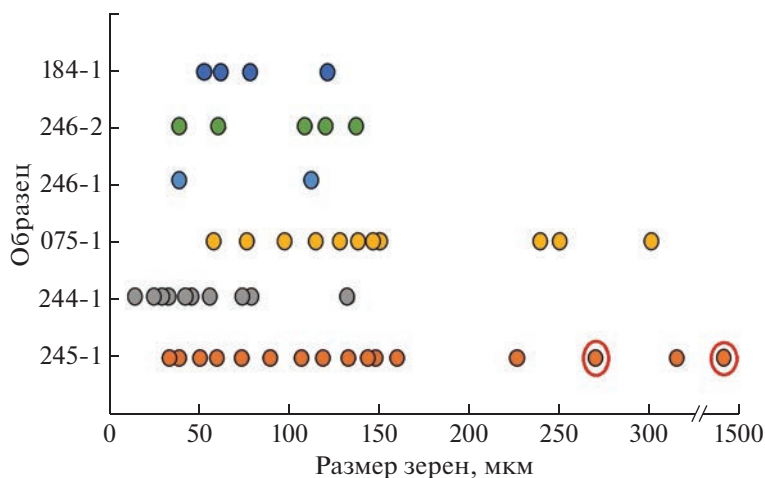


Рис. 2. Размеры сульфидных зерен в верхних горизонтах осадков колонок 37L245g, 37L244g, 37L075k, 37L246g, 37L184k. Зерна в красных кружках – силикатные обломки с включениями сульфида.

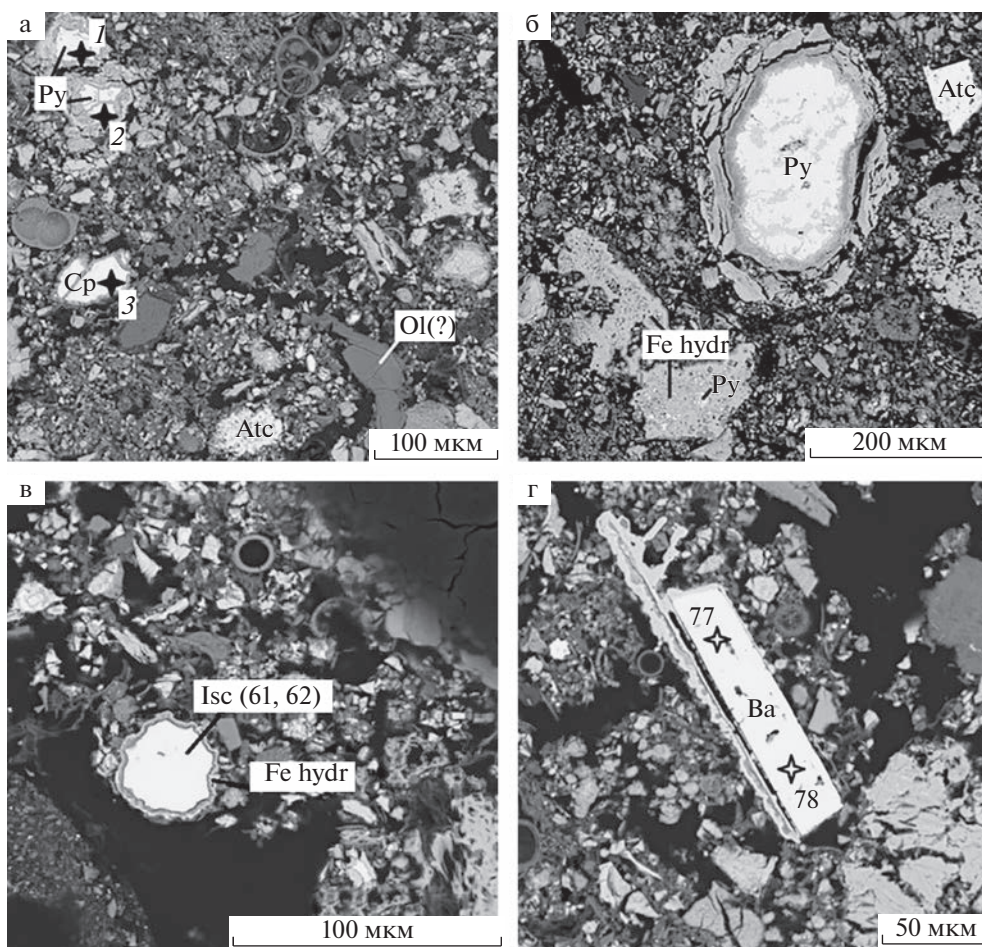


Рис. 3. Гидротермальные минералы, в различной степени замещенные гидроксидами железа в осадке, состоящем из тонкозернистого эдафогенного, гидроксидно-железистого и глинистого материала с включениями карбонатных раковин микроорганизмов. Фотографии в отраженных электронах. Образец 245-1 (интервал 0–3 см). Напыление углеродом. Черное – эпоксидная смола или тушь. В скобках – номера анализов.
 а – обломки халькопирита (Cp) $Cu_{0,97}Fe_{1,02}S_{2,01}$ (ан. 3, см. табл. 4) и пирита (Py) (ан. 1, 2, см. табл. 3) с каймами обрастания гидроксидами железа (Fe hydr), выделение атакамита (Atc), силикатный обломок (оливин?) (Ol(?)); б – пирит с каймами замещения и обрастания гидроксидами железа и почти полностью замещенный ими, в виде мелких реликтовых включений, атакамит (Atc); в – изокубанит (ан. 61, 62, см. табл. 2) с каймой обрастания гидроксидами железа; г – барит (Ba, ан. 77, 78) с каймой обрастания гидроксидами железа.

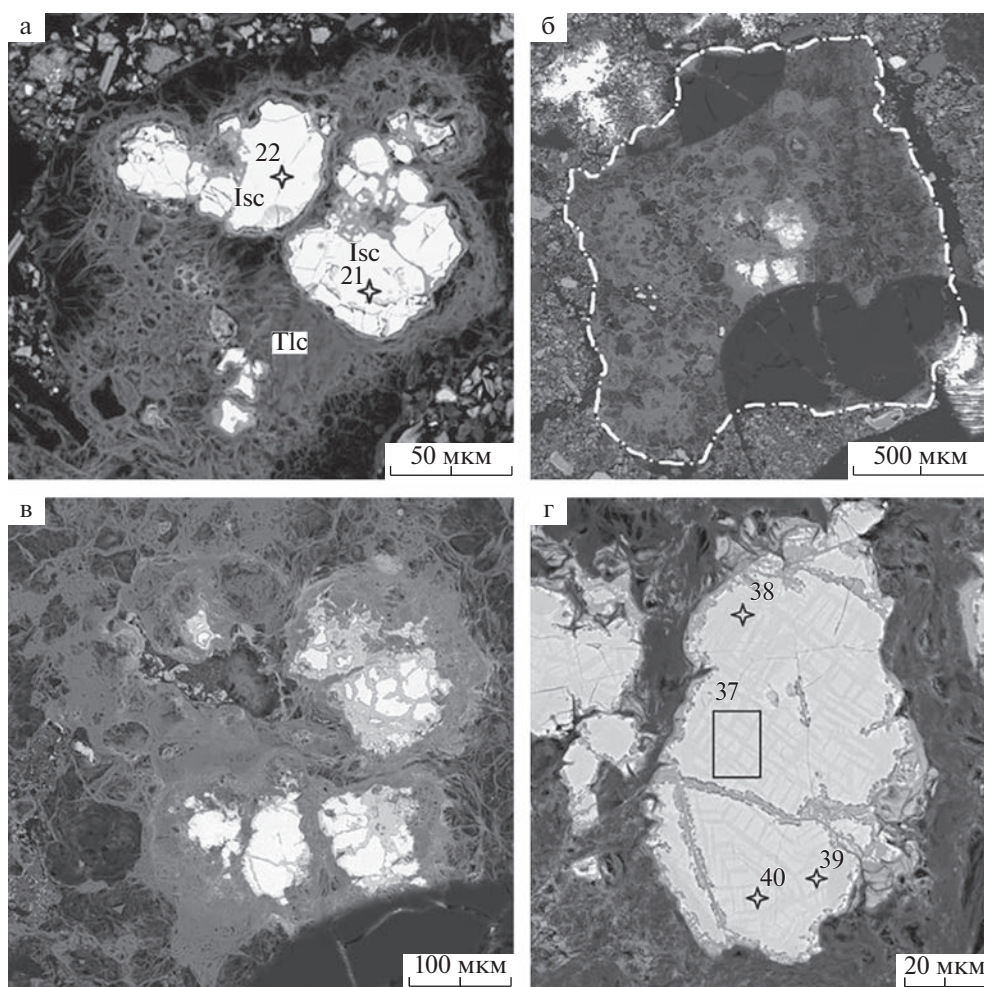


Рис. 4. Включения сульфидов меди и железа в силикатных обломках (тальке?). Фотографии в отраженных электронах. Образец 245-1 (0–3 см). Напыление углеродом.
 а – включение изокубанита (Isc) (ан. 20, 21, см. табл. 2) в тальке (Tlc); б, в – не идентифицированная фаза (светлое), состава $\text{Cu}_{3.59-4.15}\text{Fe}_{1.78-2.2}\text{S}_{5.08-5.31}$, в силикатном обломке (обведен белым пунктиром, черное – следы туши); г – то же при большем увеличении: темные пластинчатые включения (ламели) – халькопирит $\text{Cu}_{0.98-1.29}\text{Fe}_{0.78-0.99}\text{S}_{1.92-2}$.

зонта осадков гидротермального узла Победа представлены в табл. 2 и 3.

Ранее в интервале 3–8 см колонки 37L245g нами был установлен пирротин состава $\text{Fe}_{0.85}\text{S}$ с примесью Co (0.23 мас. %) и Ni (0.74 мас. %) в виде единичных мелких кристаллов [Люткевич и др., 2022]. Кроме сульфидов в осадках горизонта присутствуют также атакамит и барит. Атакамит развивается по изокубаниту, в виде отдельных скоплений в основной массе (см. рис. 3а), псевдоморфоз по обломкам кристаллов сульфидов (?) (см. рис. 3б). Кристаллы барита иногда окружены тонкими каймами гидроксидов железа (см. рис. 3г).

В одном из силикатных обломков (тальке?) размером $\approx 183 \times 200$ мкм сульфид представлен изокубанитом размером $\approx 91 \times 150$ мкм. Второе сульфидное вкрапление ($\approx 325 \times 375$ мкм) в силикатном обломке ($\approx 1618 \times 1470$ мкм) представляло собой не-

известную фазу состава $\text{Cu}_{3.57-4.22}\text{Fe}_{1.71-2.19}\text{S}_{4.99-5.31}$ с более темными ламелями халькопирита $\text{Cu}_{0.98-1.29} \cdot \text{Fe}_{0.78-0.99}\text{S}_{1.92-2}$ (см. рис. 4).

Составы не идентифицированной фазы, представленной более светлой матрицей и ламелями халькопирита, приведены в табл. 4 и 5.

Сульфидные минералы (пирит, халькопирит, изокубанит), в различной степени замещенные гидроксидами железа, присутствуют также в нижней части (3–10 см) поверхностного горизонта колонки 37L245g.

Поле Победа-2, станция 37L244g. В обр. 244-1 (0–2 см) среди рудных минералов преобладают гидроксиды железа в редких случаях с реликтами замещенного пирита (рис. 5а) и изокубанита (см. рис. 5в). Вероятно, гидроксиды железа сохраняют форму обломков или кристаллов замещенных сульфидов. Некоторые мономинеральные выде-

Таблица 2. Составы изокубанита из верхнего горизонта осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа										
	245-1							244-1			
	20	21	57	61	62	66	67	35	29	30	22
Fe	39.23	38.94	42.59	43.18	43.58	41.97	41.85	43.2	41.1	40.88	38.48
Cu	25.27	25.32	21.35	21.33	21.38	23.09	22.92	21.87	24.03	24.15	27.45
Co	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	35.59	35.7	36.13	36.71	36.93	35.81	36	36.96	37.13	36.67	34.34
Сумма	100.68	100.5	100.16	101.97	102.64	101.79	101.6	102.34	102.37	101.85	101.01

Формула в расчете на 6 атомов

Fe	1.91	1.89	2.05	2.06	2.06	2.02	2.01	2.04	1.64	1.57	1.88
Cu	1.08	1.08	0.90	0.89	0.89	0.98	0.97	0.91	0.85	0.82	1.18
Co	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	3.01	3.02	3.04	3.05	3.05	3.00	3.02	3.05	2.59	2.46	2.92

Элементы	Номера образцов и точек анализа										
	244-1	075-1									246-1
	27	1	2	13	14	15	16	17	18	19	12
Fe	38.77	43.99	44.08	43.75	44.66	39.35	43.36	45.98	45.3	45.08	44.47
Cu	26.54	20.82	20.28	21.92	20.92	18.95	22.43	19.73	20.4	20.16	18.95
Co	н.о.	н.о.	н.о.	0.47	0.6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	32.73	36.55	36.64	36.32	36.63	33.9	36.44	36.49	37.05	36.77	33.61
Сумма	98.98	101.51	101.25	102.47	102.91	99.92	102.32	102.36	102.76	102.16	101.14

Формула в расчете на 6 атомов

Fe	1.94	2.10	2.10	2.07	2.10	2.01	2.06	2.17	2.13	2.13	2.21
Cu	1.17	0.87	0.85	0.91	0.87	0.85	0.93	0.82	0.84	0.84	0.83
Co	н.о.	н.о.	н.о.	0.02	0.03	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	2.85	3.03	3.05	3.00	3.00	3.02	3.01	3.01	3.03	3.03	2.91

Примечание. н.о. – не обнаружено.

Таблица 3. Составы пирита из верхнего горизонта осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа														
	245-1									244-1			246-2	184-1	
	1	2	33	48	49	63	69	79	80	18	32	34	4	17	18
S	53.36	53.38	53.71	54.36	54.55	54.46	53.86	54.21	54.79	54.27	55.34	54.71	50.74	47.92	47.12
Fe	46.81	46.94	47.02	47.8	47.57	47.85	47.51	46.81	45.9	47.63	46.66	47.85	47.68	50.69	50.61
Cu	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.6	0.67	0.77	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Zn	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.37	н.о.	0.37	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Всего	100.17	100.32	100.73	102.16	102.1	102.68	101.97	102.07	101.46	102.06	102.2	102.8	98.99	99.69	98.91

В расчете на 3 атома

S	2.00	1.99	2.00	1.99	2.00	1.99	1.98	1.99	2.02	1.99	2.02	2.00	1.95	1.87	1.86
Fe	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	1.01	0.98	1.00	1.05	1.13	1.14
Cu	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	0.01	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Zn	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	н.о.	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.

Примечание. н.о. – не обнаружено.

Таблица 4. Составы халькопирита из верхнего горизонта осадков гидротермального узла Победа (мас. %)

Элементы	Номера образцов и точек анализа															
	245-1		245-1 (ламели)												075-1	
	3	7	3	4	5	6	7	10	11	17	30	31	36	38	29	30
Fe	31.12	29.45	26.97	26.81	27.5	25.67	30.18	25.29	23.18	25.46	25.76	30.34	26.59	26.06	34.29	34.72
Cu	33.62	34.3	38.06	38.55	37.5	40.19	34.29	40.71	43.58	39.44	40.12	34.11	38.24	39.22	32.07	31.26
Co	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.47	н.о.	н.о.	н.о.	0.23	0.27	н.о.	н.о.	0.31	0.43
Ni	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.31	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	35.07	34.58	33.73	33.55	33.83	33.54	35.13	33.48	32.54	32.08	33.59	35.42	33.85	33.56	36.17	36.18
Сумма	99.81	98.33	98.76	98.91	98.84	99.4	100.38	99.49	99.3	96.97	99.7	100.14	98.68	98.84	102.84	102.6

Формула в расчете на 4 атома

Fe	1.02	0.98	0.91	0.90	0.92	0.86	0.99	0.85	0.78	0.88	0.86	0.99	0.89	0.88	1.09	1.11
Cu	0.97	1.01	1.12	1.14	1.10	1.18	0.99	1.20	1.30	1.20	1.18	0.98	1.13	1.16	0.90	0.87
Co	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	0.01	н.о.	н.о.	0.01	0.01
Ni	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
S	2.01	2.01	1.97	1.96	1.97	1.96	2.00	1.95	1.92	1.93	1.95	2.02	1.98	1.97	2.00	2.01

Примечание. н.о. – не обнаружено.

Таблица 5. Состав матрицы и результаты площадных измерений (п) сульфидного зерна, предположительно $Cu_4Fe_2S_5$, в силикатном обломке (обр. 245-1, мас. %)

Элемент	Номера точек анализа											
	13	33	39	40	42	18(п)	32(п)	37(п)	41(п)	19(п)	20(п)	
Fe	22.91	19.82	18.74	19.44	19.08	21.69	22.46	21.7	20.47	20.92	23.42	
Cu	44.11	47.48	49.73	49.23	49.43	45.37	43.92	46.08	47.81	46.54	43.39	
S	32.72	32	30.73	31.26	30.82	32.46	32.73	32.06	31.54	31.44	31.76	
Сумма	99.73	99.3	99.19	99.92	99.33	99.52	99.1	99.84	99.82	101.28	101.59	

Формула в расчете на 11 атомов

Fe	2.12	1.86	1.78	1.83	1.81	2.02	2.09	2.02	1.92	1.97	2.20
Cu	3.59	3.91	4.15	4.06	4.11	3.71	3.60	3.77	3.94	3.86	3.59
S	5.28	5.23	5.08	5.11	5.08	5.27	5.31	5.20	5.15	5.17	5.21

ления гидроксидов железа имеют форму неправильных “коронавидных” скоплений (см. рис. 5б).

Атакамит развивается в ассоциации с гидроксидами железа в межзерновом пространстве (см. рис. 5в). Эдафогенный материал представлен обломками силикатных минералов (талька?) (см. рис. 5д).

В нижней части (2–5 см) поверхностного слоя (обр. 244-2) сульфиды не обнаружены. Присутствуют гидроксиды железа (см. рис. 5г, д) и атакамит в виде псевдоморфоз по сульфидам(?) (см. рис. 5е).

Гидроксиды Fe образуют мономинеральные хлопьевидные скопления неправильной, иногда удлиненной формы (см. рис. 5г), тонко рассеянную вкрапленность в основной массе (см. рис. 5д),

редко – псевдоморфозы по мелким (до 2 мкм) идиоморфным кристаллам кубического габитуса (пирита?). Выделения гидроксидов Fe нередко содержат примесь Si (до 5.69 мас. %), замещая силикатные минералы (см. рис. 5д).

Атакамит, обычно в ассоциации с гидроксидами Fe, образует неправильной формы выделения, возможно, по сульфидам меди и железа (см. рис. 5е), а также заполняет межзерновое пространство.

Поле Победа-1, станция 37L075к. Осадки поверхностного горизонта (обр. 075-1, интервал 0–2 см) состоят из кальцитовых раковин без признаков замещения. Рудные обломки размером 0.1–0.5 мм составляют не более 10–15% площади шлифа осадков. В то же время основная масса осадков пропитана бурыми гидроксидами железа

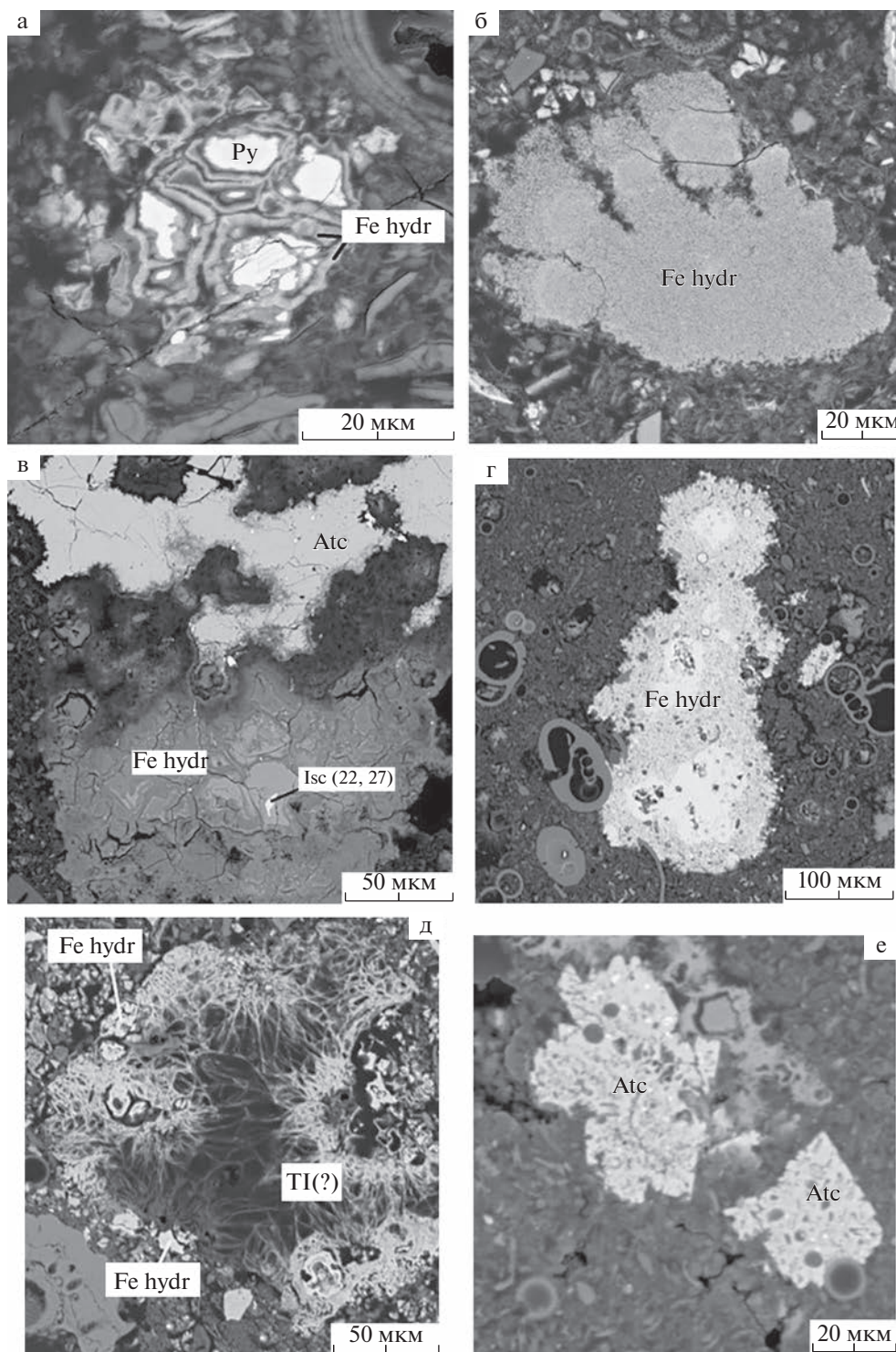


Рис. 5. Формы выделения гидроксидов железа и атакамита в поверхностном слое ст. 37L244g. Фотографии в отраженных электронах. Образцы 244-1 (0–2 см, а–в) и 244-2 (2–5 см, г–е).
 а, б, г–е – напыление золотом, в – углеродом.
 а – каймы обрастания гидроксидов железа (Fe hydr) в агрегате (?) пирита (Py); б – “короновидный” фрагмент железистой корки (?); в – псевдоморфозы гидроксидов железа по изокубаниту (ан. 22, 27, см. табл. 2) и атакамит в основной массе осадка (Atc) в ассоциации с гидроксидами железа; г – хлопьевидное мономинеральное выделение гидроксидов железа в биогенном осадке с раковинами хорошей сохранности; д – силикатный обломок (талк?) (Tlc) в основной массе осадка с тонкой вкрапленностью гидроксидов железа (Fe hydr); е – псевдоморфозы атакамита (Atc) по сульфидам (?).

и содержит мелкие (пылеватые) частицы сульфидов. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, изокубанитом.

Преобладают гидроксиды железа, обычно с мелкой реликтовой вкрапленностью пирита (рис. 6а). Форма обломков редко угловатая или в виде отдельных кристаллов, их сростков (см. рис. 6б). В основном обломки имеют округлую форму. Иногда гидроксиды Fe, замещающие пирит, имеют коломорфную структуру (см. рис. 6в).

В существенно меньших количествах присутствуют зерна халькопирита (см. рис. 6г) и изокубанита (см. рис. 6д), которые также по краям замещаются гидроксидами Fe.

Встречаются единичные зерна барита без кайм гидроксида железа (см. рис. 6е).

Рудопроявление Побела-3, станция 37L246g. В образце 246-1 (интервал 0–2 см) установлены изокубанит и халькопирит, которые замещаются гидроксидами Fe (рис. 7а). Встречаются обломки силикатных минералов, как относительно свежие (см. рис. 7б), так и практически полностью замещенные гидроксидами Fe, содержащими примесь Si, Mg, Al и др. В некоторых гидроксидах железа присутствует S (до 19.96 мас. %), вероятно, представляющая собой реликтовую примесь после замещения пирита.

Степень окисления сульфидов и развития гидроксидов в образце 246-2 выше, чем в горизонте 0–2 см. В гидроксидах железа установлены реликты пирита (от 20 мкм). Иногда гидроксиды железа замещают призматические кристаллы с реликтами сульфида железа (см. рис. 7в) и образуют каймы по скоплениям выщелоченных призматических кристаллов, предположительно, пирротина (см. рис. 7г). Встречаются зерна изокубанита (от 20 мкм до 150 мкм) с каймами замещения и обрастания гидроксидами железа (см. рис. 7д) и в виде реликтов в нем.

Обнаружено 2 зерна ильменита $Fe_{0.97-1.12}Ti_{0.91-0.99} \cdot O_{2.83-2.93}$ (см. рис. 7е), а также барит с каймами гидроксида железа.

Рудопроявление Побела-3, станция 37L184к. Гидроксиды железа составляют не более 5–7% осадка, представленного пелитовой (глинистой) основной массой с включениями кальцитовых раковин хорошей сохранности (рис. 8). В образце 184-1 (интервал 0–5 см) присутствуют гидроксиды железа с мелкими реликтами пирита (см. рис. 8а).

Образец 184-2 (интервал 2–10 см) содержит гидроксиды железа (см. рис. 8б), присутствует эдафогенный материал, кристаллы барита, не измененные и с каймами обрастания гидроксидами железа, и не установленные фазы – оксиды (гидроксиды?) железа и марганца с примесями, со средним составом по двум анализам (мас. %) CO_2

29.35, FeO 29.33, MnO 19.6, SiO_2 7.4, CaO 4.98, MgO 2.31, Na_2O 2.05, Al_2O_3 1.28, CuO 1.03, K_2O 0.33, TiO_2 0.25.

Станция 37L215к. Поверхностный слой (0–10 см, обр. 215-1) состоит из не измененных кальцитовых раковин, погруженных в глинисто-железистый субстрат (рис. 9). Раковины фораминифер иногда окрашены гидроксидами железа до коричневого цвета, присутствуют обломки вулканического стекла, кристаллики барита, единичные знаки пирита, сульфидов меди (?). В составе фракции >0.05 мм методом рентгенофазового анализа кроме кальцита (76%) установлены также кварц, альбит, калиевые полевые шпаты, глинистые минералы, хлорит, палыгорскит, серпентин, тальк, гетит, в составе глинистой фракции: смектит, кварц, хлорит, каолинит и единичные обломки полевых шпатов. Общая карбонатность осадков горизонта составляет 76.23% при низком содержании Fe_2O_3 (5.55%) и $Cu_{бкв}$ (0.03%) [Габлина и др., 2021].

Исследования на СЭМ показали, что значительная часть раковин микроорганизмов и цементирующая масса обогащены Fe и Si (см. рис. 9). При содержании (мас. %) CaO 72.40% (суммарный спектр карты), количество SiO_2 достигает 12.48%, FeO 5.28%, Al_2O_3 4.62%, MgO 1.31%. Кроме того, установлены примеси Na, K и Yb (до 1.02% Yb_2O_3). Это связано с присутствием в основной массе глинистых минералов, хлорита, палыгорскита, полевых шпатов, гетита и других минералов, идентифицированных рентгенофазовым анализом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существенная часть минерального состава изученных осадков представлена гидроксидами железа, среди которых выделяются следующие структурно-морфологические типы: 1) тонко рассеянная вкрапленность в основной массе осадка в смеси с глинистым и эдафогенным материалом; 2) структуры замещения сульфидных и силикатных минералов – от каемок замещения до образования псевдоморфоз по ним; 3) каймы обрастания (иногда колломорфной структуры) вокруг сульфидов и барита; 4) обособленные мономинеральные выделения хлопьевидной и “короновидной” формы, сформированные в плюме(?) и/или представляющие собой фрагменты железистых корок.

Фрагменты корок и выделения, предположительно сформированные в плюме, отмечены в поверхностном горизонте (0–5 см) ст. 37L244g (см. рис. 5). Структуры различной степени замещения сульфидов (от кайм до псевдоморфоз с реликтовыми вкраплениями замещенных минералов) наблюдались во всех образцах поверхностного го-

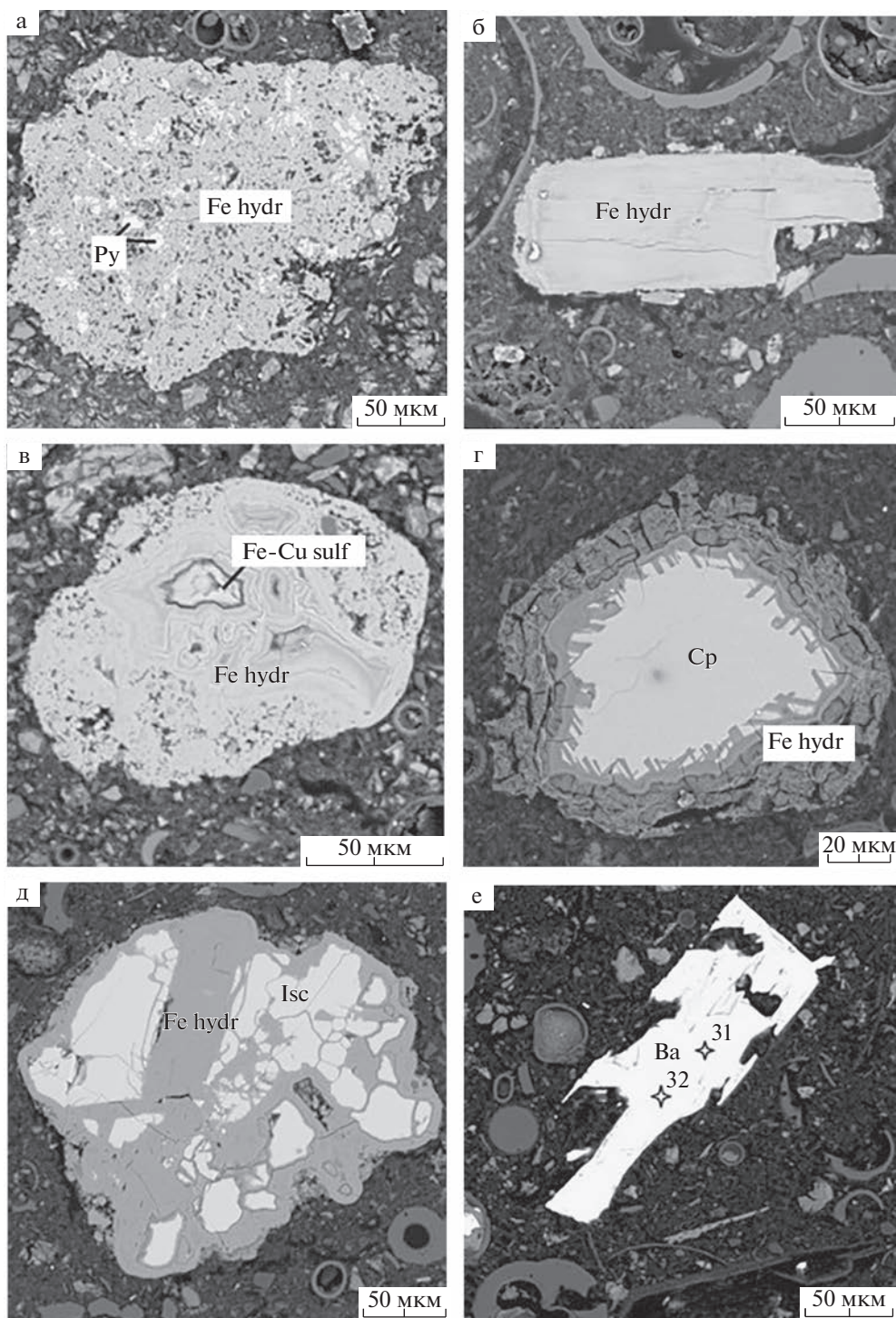


Рис. 6. Характер выделения гидроксидов железа и барита в поверхностном горизонте ст. 37L075k. Фотографии в отраженных электронах. Образец 075-1 (0–2 см).

а–д – напыление золотом, е – углеродом.

а – псевдоморфоза гидроксидов железа (Fe hydr) по пириту, с реликтовой вкрапленностью пирита (Py); б – псевдоморфоза (?) гидроксидов железа по идиоморфному кристаллу сульфида (?); в – колломорфная структура замещения гидроксидными железа зерна сульфида меди и железа (Fe–Cu sulf); г – каймы замещения и обрастания гидроксидов железа вокруг кристалла халькопирита (Cp); д – структура замещения изокубанита (Isc) гидроксидными железа; е – кристалл барита (Ba) (ан. 31, 32) в биогенном осадке.

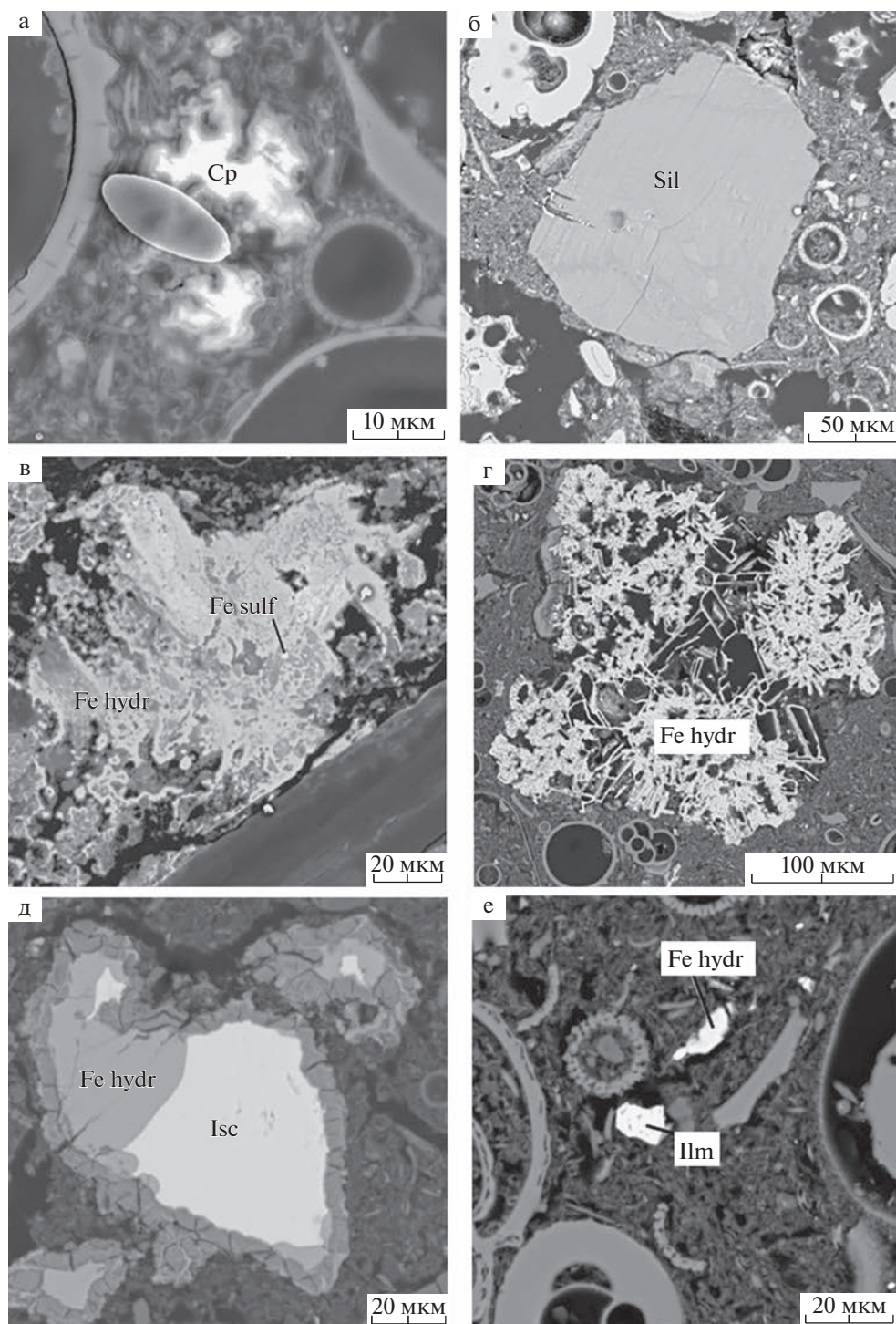


Рис. 7. Сульфидные минералы, гидроксиды железа и эдафогенный материал в поверхностном горизонте ст. 37L246g. Фотографии в отраженных электронах.

а–д – напыление золотом, е – углеродом.

а, б – обр. 246-1 (0–2 см): а – халькопирит (Cp) с каемками гидроксидов железа (?), б – силикатный обломок (Sil) состава (мас. %) O 40.66, Mg 18.72, Al 1.14, Si 16.24, Ca 0.12, Fe 4.56, Cu 0.16 (сумма 82.49); в – псевдоморфозы гидроксидов железа (Fe hydr) по призматическим кристаллам сульфида железа (Fe sulf); г – каемки и тонкокристаллические агрегаты гидроксидов железа по скоплению полностью выщелоченных призматических кристалликов, предположительно, пирротина; д – частично замещенное и обросшее каймой гидроксидов железа зерно изокубанита (Isc); е – зерно ильменита $\text{Fe}_{0.97}\text{Ti}_{0.99}\text{O}_{2.93}$ (Ilm) в биогенном карбонатном осадке.

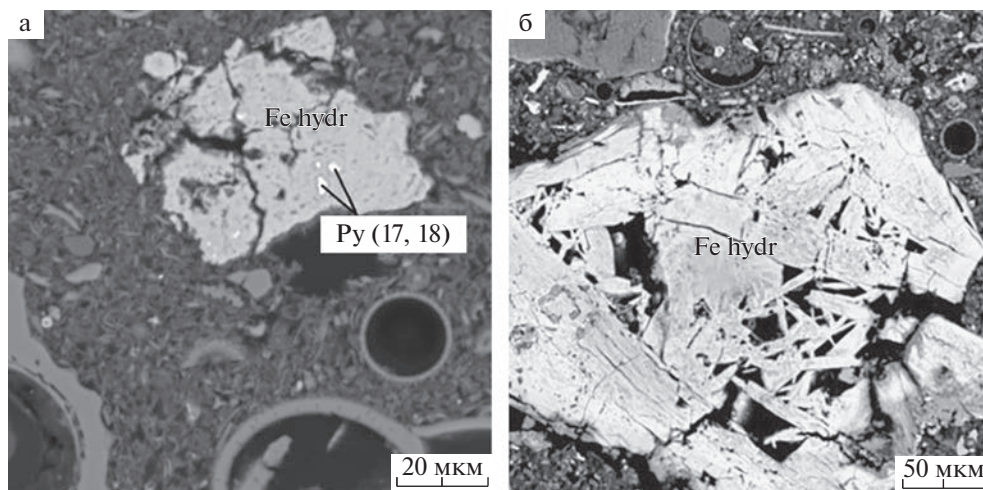


Рис. 8. Псевдоморфозы гидроксидов железа в поверхностном слое. Станция 37L184k. Фотографии в отраженных электронах. Напыление углеродом.

а – реликты пирита (Py) (ан. 17, 18) в гидроксиде железа (Fe hydr), обр. 184-1 (0–5 см); б – гидроксиды железа по скоплению кристаллов сульфида (?), обр. 184-2 (2–10 см).

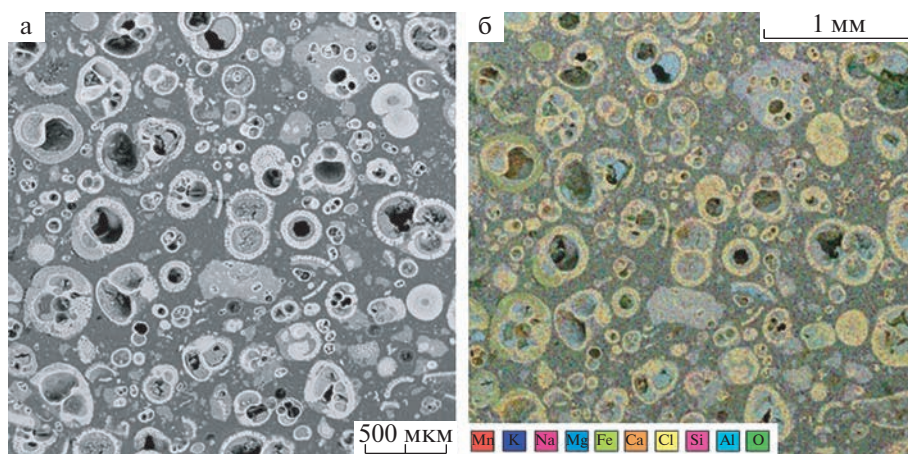


Рис. 9. Кокколит-фораминиферовые осадки ст. 37L215k Обзорная фотография в отраженных электронах (а) с картой распределения элементов (б). Образец 215-1 (0–10 см). Напыление углеродом.

ризонта гидротермального узла Победа. Вблизи предполагаемого источника (ст. 37L245g), а также в осадках ст. 37L246g наиболее интенсивно (с образованием псевдоморфоз) замещены обломки пирита (см. рис. 3б). Сульфиды Cu–Fe чаще замещены лишь по краям (каймы замещения) и по трещинам (см. рис. 3, 4, 5). Более интенсивное замещение не только пирита, но и сульфидов Cu–Fe, с образованием псевдоморфоз наблюдаются на большем удалении от источника (ст. 37L075k, 37L184k) (см. рис. 6, 7). Каймы обрастания обычно развиваются вокруг обломков сульфидов, уже частично или полностью замещенных гидроксидом (см. рис. 3, 6, 7), а также вокруг кристаллов барита (см. рис. 3). Гидроксиды, тонко рассеянные в основной массе осадков,

распространены повсеместно, в том числе за пределами зоны гидротермальной активности (ст. 37L215k).

Образование различных структурно-морфологических типов гидроксидов Fe могло происходить: 1) в плюме под воздействием кислородсодержащей морской воды [Feely et al., 1992; Краснов и др., 1992; Гордеев, Богданов, Гурвич, 1993; Гурвич, 1998; Dias, 2006; Gurvich, 2006; Русаков, 2007, 2009; Судариков и др., 2014 и др.]; 2) в осадке, в результате гальмиролиза [Hannington et al., 1988; Maslennikov et al., 2023]; 3) под воздействием флюидов, проходящих сквозь осадки, которое проявляется в образовании бурых пятен и железистых корок на поверхности осадков [Габлина, 2022; Габлина и др., 2017]. Различия в составе этих



Рис. 10. Составы не идентифицированной сульфидной фазы из поверхностного горизонта колонки 37L245g и составы ранее изученных фаз, по [Mozgova et al., 2005].

морфологических типов и условия их образования является предметом дальнейших исследований.

В поверхностном горизонте осадков, вскрытых на самых близких к активному гидротермальному источнику станциях 37L244g и 37L245g (поле Победа-2), среди гидротермального материала широким распространением пользуются обломки измененных (оталькованных) пород с включениями сульфидов (изокубанита, халькопирита, пирита) размером от 20 мкм до 0.5–1 мм, в различной степени замещенных гидроксидами железа. В одном из таких обломков установлена фаза $\text{Cu}_{3,57-4,22}\text{Fe}_{1,71-2,19}\text{S}_{4,99-5,31}$ с ламелями халькопирита $\text{Cu}_{0,98-1,29}\text{Fe}_{0,78-0,99}\text{S}_{1,92-2}$ (см. рис. 4). Гидроксиды железа по ним развиты в виде узких каемок и тонких прожилков.

Составы матрицы приведены в табл. 5. Ранее подобные составы не встречались в океане (рис. 10). Формулу фазы можно представить как $\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{S}_5$ или Cu_2FeS_3 . Попытки диагностировать ее с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и EBSD не привели к результату. Несмотря на повышенное содержание меди относительно железа, фаза не попадает в поле высокотемпературного (700°C) борнитового твердого раствора, представленного на диаграмме в работе [Yund, Rullerud, 1966], из-за более высокого содержания серы.

Приуроченность сульфидов меди и железа к обломкам измененных пород субстрата в поверхностном слое ст. 37L245g свидетельствует о их эдафогенном происхождении и вероятном осаждении из восходящего плюма вблизи источника. Данные, подтверждающие близость к источнику ст. 37L244g, расположенной в ≈400 м от ст. 37L245g, приведены также в работе [Kuksa et al., 2021].

В колонке 37L075k поля Победа-1 максимальный размер частиц гидротермального материала составляет 300 мкм, преобладают более мелкие частицы (59–150 мкм). Они представлены преимущественно гидроксидами железа, замещающими те же сульфиды – изокубанит, халькопирит, пирит. Но процесс замещения здесь проявлен интенсивнее, сульфиды в редких случаях окружены широкой каймой гидроксидов, обычно они наблюдаются в виде реликтовых включений и тонкой вкрапленности в гидроксидах железа. Наиболее интенсивно замещается пирит (см. рис. 6).

Состав поверхностного слоя осадков станций 37L246g и 37L184k, расположенных в 100 м друг от друга в пределах рудопроявления Победа-3, различается. В осадках ст. 37L246g присутствуют те же рудные минералы, что и в описанных выше колонках – пирит, сульфиды Cu и Fe при преобладании гидроксидов Fe. Размер обломков до ≈137 мкм.

На основании присутствия сульфидов Cu и Fe, характерных для проксимальных отложений вблизи гидротермального источника [Гурвич, 1998], авторы работы [Kuksa et al., 2021] предположили, что в районе рудопроявления Победа-3, вблизи ст. 37L246g мог находиться гидротермальный источник. Этот вывод подтверждается присутствием в горизонте 2–5 см (обр. 246-2, см. рис. 7г) агрегатов предположительно пирротина, полностью выщелоченного и замещенного гидроксидами железа. Предположение основано на полной идентичности этих агрегатов по форме кристаллов, характеру их срастания и по структурам замещения их пиритом, рыхлым пирротиновым рудам, описанным ранее в пределах поля Победа-1 [Габлина и др., 2018]. Пирротин – наиболее ранний и наименее устойчивый сульфидный минерал, выпадающий из восходящего плюма вблизи источника.

В поверхностном слое колонки 37L184k рудные минералы практически полностью представлены гидроксидами железа, в которых иногда присутствуют реликты силикатных минералов, мелкие реликтовые включения пирита (см. рис. 8), или в химическом составе отмечается примесь Si, Al, Mg, Ca, свидетельствующая о замещении ими силикатных минералов. Также отмечаются единичные кристаллы барита, окруженные тонкой пленкой (каймой обрастания) гидроксидов железа. Размер обломков редко превышает 122 мкм, основная масса гидроксидов железа рассеяна в матрице осадков в виде тонкой (1–2 мкм) вкрапленности. Эти признаки свидетельствуют о большем удалении ст. 37L184k, чем ст. 37L246g, от предполагаемого гидротермального источника.

По данным гидрофизического зондирования (рис. 11) максимумы температуры и солености расположены между зондами 37L84z и 37L85z (37L84z – примерно на 70 м глубже и в 430 м на ЗЮЗ от станции 37L246g) и распространяются от зондов 37L84z и 37L85z в сторону уменьшения глубины (в направлении колонок 37L246g и 37L184k). Данные сопоставления позволяют предположить наличие гидротермального источника на расстоянии около 300 м от ст. 37L246g ниже по склону (см. рис. 1).

Атакамит является одним из надежных индикаторов низкотемпературных процессов в рудоносных осадках на дне океана [Hannington, 1993; Русаков и др., 2013]. В исследуемых нами поверхностных горизонтах его образование связано с переотложением меди, выщелоченной из сульфидов, в окислительной обстановке в процессе гальмиролиза при взаимодействии морская вода–осадок. Это подтверждается его ассоциацией с гидроксидами железа.

В распределении рудных минералов в поверхностном горизонте узла Победа относительно устья гидротермальных растворов установлена

следующая закономерность: вблизи источников распространены сульфиды Cu и Fe (изокубанит, халькопирит), с удалением они сменяются гидроксидами железа, а сульфиды представлены редкой мелкой реликтовой вкрапленностью в них пирита. Подобная закономерность описана ранее для других полей САХ и ВТП [Rudnicki, Elderfield, 1993; Гурвич, 1998 и др.]. Е.Г. Гурвич связывает такое распределение с тем, что железо дольше остается в растворе, в то время как медь быстрее переходит в твердую фазу в виде сульфидной взвеси и выпадает в осадок. В результате величина соотношения Cu/Fe во взвеси уменьшается с удалением от источника.

Как показали наши исследования, этот процесс отражается даже в соотношении Cu/Fe в химическом составе изокубанита и халькопирита.

Сравнение сульфидов меди и железа по соотношению Cu/Fe (ат. %) показывает разницу в их составах в зависимости от расположения колонок. В теоретическом составе изокубанита соотношение Cu/Fe = 0.5, в изокубаните верхнего горизонта колонки 37L245g соотношение Cu/Fe = 0.48, колонки 37L244g = 0.54, колонки 37L075k Cu/Fe = 0.41, колонки 37L246g, где изокубанит сильно изменен = 0.37. На диаграмме (рис. 12) видно, что состав изокубанита из верхнего горизонта колонок 37L245g и 37L244g близки к теоретическому или обогащены Cu. В верхнем горизонте колонок 37L075k и 37L246g изокубанит сильно изменен и содержит больше Fe.

Составы халькопиритов из верхнего горизонта разных колонок тоже различаются по соотношению Cu/Fe (ат. %): в теоретическом составе соотношение Cu/Fe = 1, в колонке 37L245g = 0.99, в ламелях не идентифицированной фазы из колонки 37L245g = 1.28, в колонке 37L075k = 0.8. В халькопирите руд Победа (неопубликованные данные авторов) соотношение Cu/Fe составляет 0.9. На диаграмме составов (рис. 13) видно, что халькопирит из верхнего горизонта колонки 37L245g близок к теоретическому составу, а халькопирит из верхнего горизонта колонки 37L075k отличается пониженным содержанием Cu.

Изменение состава изокубанита и халькопирита в верхних горизонтах колонок объясняется окислением меди до 2^+ и ее выносом. При этом в осадках в процессе гальмиролиза образуется атакамит, характерный главным образом для нижних частей поверхностного горизонта, подвергавшихся более длительному воздействию окислительной среды.

В соотношении Fe/S в пирите также наблюдаются изменения в зависимости от расположения колонок (рис. 14а). За счет уменьшения количества серы в пирите соотношение Fe/S растет по мере удаления колонки от гидротермального источника и достигает максимальных значений в

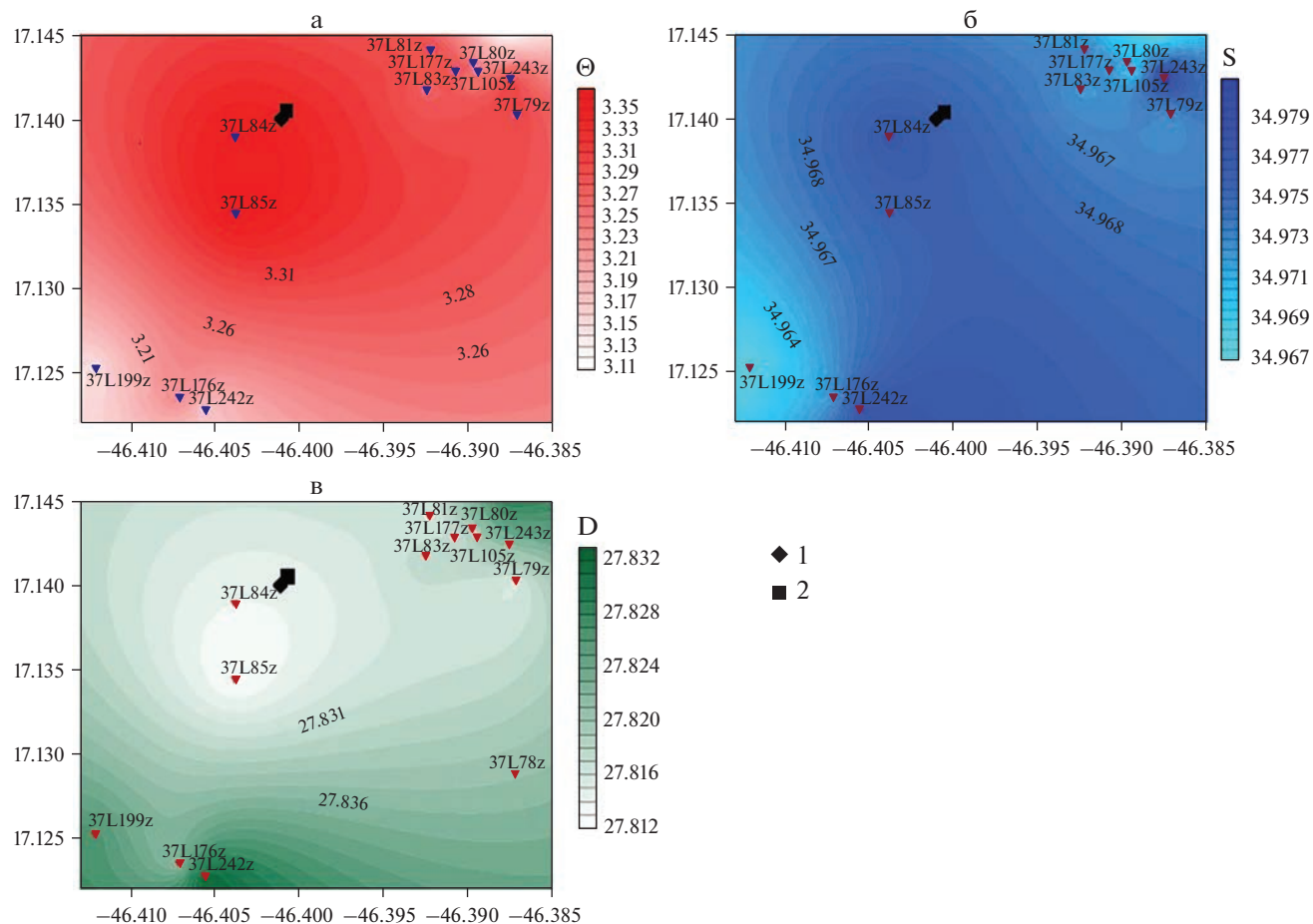


Рис. 11. Распределение гидрофизических параметров по результатам зондирования (z): потенциальной температуры Θ (а), солёности S (б) и потенциальной плотности D (в), на горизонте 2100 м. 1, 2 – станции отбора проб осадков: 1 – 37L246g, 2 – 37L184k.

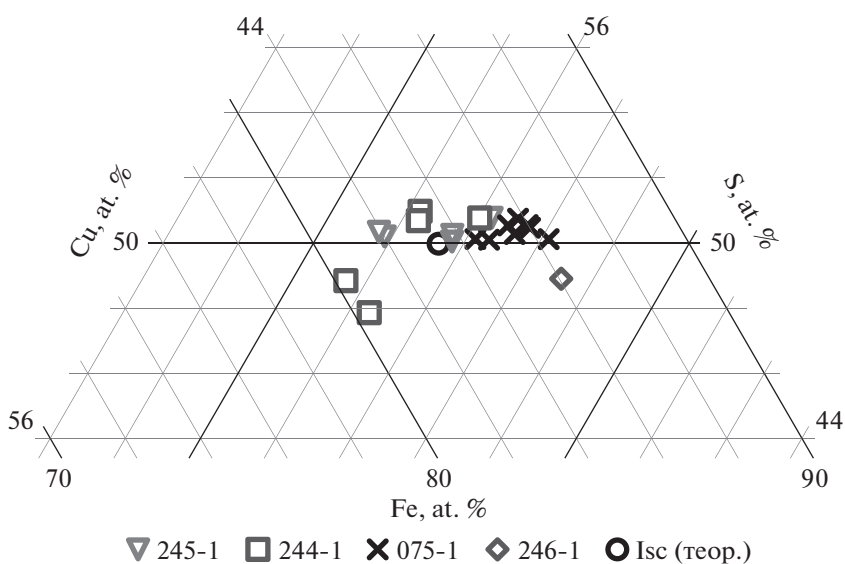


Рис. 12. Составы изокубанита из поверхностного горизонта рудоносных осадков гидротермального узла Победа.

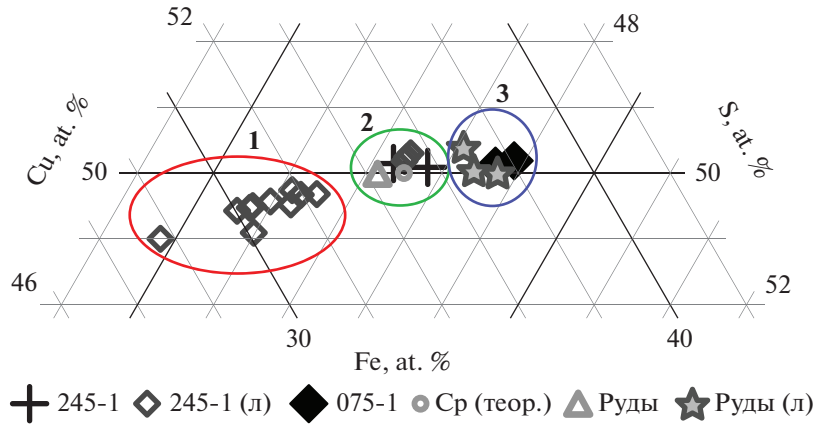


Рис. 13. Составы халькопирита из поверхностного горизонта осадков рудоносных осадков и руд гидротермального узла Победа. Группа 1 – халькопирит из ламелей (л) не идентифицированной фазы из верхнего горизонта осадков станции 37L245g; группа 2 – теоретический состав халькопирита, халькопирит из верхнего горизонта осадков станции 37L245g и из сульфидных руд гидротермального узла Победа (ст. 37L204d, неопубликованные данные авторов); группа 3 – халькопирит из верхнего горизонта осадков станции 37L075k и из ламелей (л) в сульфидных рудах гидротермального узла Победа (ст. 37L204d и ст. 37L107d, неопубликованные данные авторов).

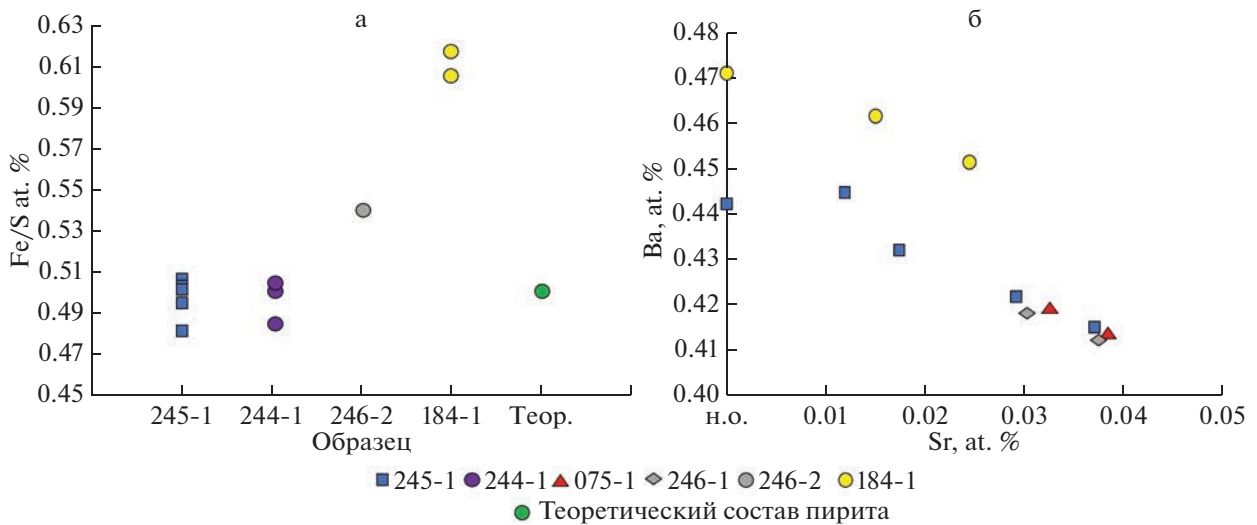


Рис. 14. Составы пирита (а) и барита (б) из верхнего горизонта рудоносных осадков гидротермального узла Победа.

колонках 37L184k и 37L246g. Теоретическому составу в большей степени отвечают пириты из колонок 37L244g и 37L245g.

Барит был обнаружен во всех колонках, кроме 37L244g, как в свежем виде, так и с каймами обрастания гидроксидами железа. Практически во всех зернах барита отмечается примесь стронция (см. рис. 14б).

Отношение Ba/Sr в колонках не зависит от их положения относительно гидротермального источника: в верхнем горизонте колонок 37L245g и 37L184k отношение Ba/Sr составляет 0.029, в колонке 37L246g 0.052, в колонке 37L075k 0.054. Как правило, Sr и Ba легко изоморфно замещают друг

друга и не характеризуют *PT*-условия в системе, но, вероятно, говорят, о разном составе флюида (И.В. Пеков, устное сообщение).

Замещение сульфидов гидроксидами железа начинается, вероятно, еще во взвеси и продолжается после выпадения частиц в осадок. Чем дольше они находятся во взвеси, тем интенсивнее замещение, что отражается в увеличении степени окисления сульфидных частиц с удалением от гидротермального источника. При удалении от источника гидроксида железа выделяются и как самостоятельная фаза, в результате интенсивного разбавления гидротермального плюма, богатого Fe, кислородсодержащей морской водой.

Таблица 6. Содержание CaCO_3 и основных элементов (%) в верхнем горизонте осадков (по материалам [Габлина и др., 2021])

№ станции (интервал)	Fe _{бкв}	Mn _{бкв}	Cu _{бкв}	Zn _{бкв}	Ba	P	CaCO ₃	Si	Mg
37L 245g (3-8)	33.37	0.05	4.55	0.24	0.12	0.40	11.67	7.19	2.90
37L 244g (5-10)	19.65	0.06	2.51	0.18	0.06	0.21	45.35	7.08	1.48
37L 184k (2-10)	16.83	0.30	0.33	0.08	0.03	0.09	71.37	3.68	1.50
37L 215 k (2-10)	8.83	0.36	0.03	0.02	0.02	0.07	76.23	3.75	0.26

Примечание. бкв – содержание элемента, рассчитанное на бескарбонатное вещество.

Изменение минерального состава осадков поверхностного горизонта отражается в их химическом составе (табл. 6): с удалением от гидротермального источника в них существенно снижается содержание всех рудных элементов, за исключением Mn, снижается также содержание Ba, P, литогенных элементов (Si, Mg). В то же время растет содержание CaCO_3 (от 11.67 до 76.23 мас. %), что связано с уменьшением в составе осадков гидротермального материала и преобладанием осадочного вещества, представленного кальцитовыми раковинами микроорганизмов.

ВЫВОДЫ

1. При удалении от источников, зафиксированных при гидрологическом зондировании и предполагаемых, наблюдается уменьшение размеров и количества обломков гидротермальных минералов и эдафогенного материала, и усиление степени окисления (замещения гидроксидами железа) обломков сульфидов. Это отражается в химическом составе осадков: с удалением от гидротермального источника в них существенно снижается содержание основных рудных элементов и возрастает содержание CaCO_3 . Такая закономерность согласуется с опубликованными данными по другим гидротермальным полям САХ и узлу Победа.

2. Исключение составляет ст. 37L246g, что дает основание согласиться с предположением, высказанным в работе [Kuksa et al., 2021], о возможности существования вблизи этой станции активного источника. Данные гидрофизических исследований позволяют предположить, что источник был расположен на расстоянии около 300 м от ст. 37L246g ниже по склону.

3. Среди гидроксидов железа выделяются следующие структурно-морфологические типы: 1) тонко рассеянная вкрапленность в основной массе осадка в смеси с глинистым и эдафогенным материалом; 2) структуры замещения сульфидных и силикатных минералов – от каемок замещения до образования псевдоморфоз по ним; 3) каймы обрастания вокруг сульфидов и барита; 4) обособленные мономинеральные выделения,

сформированные в плюме (?) и/или представляющие собой фрагменты железистых корок. С удалением от гидротермальных источников преобладающими становятся структуры псевдоморфного замещения и тонко рассеянная вкрапленность.

4. В химическом составе сульфидов меди и железа (изокубанита, халькопирита) при удалении от источника наблюдается уменьшение отношения Cu/Fe за счет выноса меди из них в окислительных условиях. В обломках пирита в этом направлении увеличивается соотношение Fe/S.

5. В поверхностном горизонте колонки ст. 37L245g (поле Победа-2), расположенной предположительно вблизи гидротермального источника, установлена новая фаза состава $\text{Cu}_{3.57-4.22} \cdot \text{Fe}_{1.71-2.19} \text{S}_{4.99-5.31}$ с включениями ламелей халькопирита. Сульфид этого состава и изокубанит присутствуют в виде вкраплений в обломках оталькованных пород, что позволяет отнести их к эдафогенному материалу, выпавшему из плюма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность И.В. Певкову – за консультацию и полезные советы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (ГИН РАН).

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 Р2 и Р3 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.) // Материалы конференции “Новое в познании процессов рудообразования”. 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. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 89–93.
- 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. 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.
- Габлина И.Ф.* Отличительные особенности двух генетических типов сульфидных руд в Центральной Атлантике // Литология и полез. ископаемые. 2022. № 2. С. 161–180.
- Гордеев В.В., Богданов Ю.Л., Гурвич Е.Г.* Геохимия металлоносных осадков и особенности рассеяния гидротермального материала // Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. М.: Наука, 1993. С. 54–71.
- Гурвич Е.Г.* Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Научный мир, 1998. 340 с.
- Краснов С.Г., Черкашев Г.А., Айнемер А.И. и др.* Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб.: Недра, 1992. 278 с.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
- Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г.* Гидротермальные образования рифтовых зон океана. М.: Наука, 1990. 256 с.
- Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Мурдмаа И.О. и др.* Металлоносные осадки и их генезис // Геолого-геофизические исследования в восточной части Тихого океана. М.: Наука, 1976. С. 289–379.
- Люткевич А.Д., Габлина И.Ф., Дара О.М. и др.* Минеральные фазы цинка в рудоносных осадках гидротермального узла Победа (17°07.45′–17°08.7′ с.ш. САХ) // Литология и полез. ископаемые. 2022. № 5. С. 465–482.
- Русаков В.Ю.* Поставка и осаждение гидротермального железа в рифтовой долине на 26° и 29° с.ш. Срединно-Атлантического хребта // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 266–281.
- Русаков В.Ю.* Геохимические особенности гидротермальных плюмов над полями ТАГ и Брокен Спур (Срединно-Атлантический хребет) // Геохимия. 2009. № 2. С. 115–140.
- Русаков В.Ю., Шилов В.В., Рыженко Б.Н. и др.* Минералого-геохимическая зональность осадков гидротермального узла “Семенов” (13°31′–13°30′ с.ш., Срединно-Атлантический хребет) // Геохимия. 2013. № 8. С. 717–742.
- Судариков С.М., Каминский Д.В., Наркевский Е.В.* Гидротермальные ореолы рассеяния в придонных водах Срединно-Атлантического хребта. СПб.: ФГУП “ВНИИ-Океангеология им. И.С. Грамберга”, 2014. 161 с.
- Хусид Т.А., Оськина Н.С., Лукашина Н.П. и др.* Бентосные и планктонные фораминиферы в гидротермально активных районах Срединно-Атлантического хребта // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26. № 1. С. 115–126.
- Dias A.S., Barriga F.J.A.S.* Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted Saldanha hydrothermal field (36°34′ N; 33°26′) at MAR // Mar. Geol. 2006. V. 225. P. 157–175.
- Feely R.A., Massoth G.J., Baker E.T. et al.* Tracking the dispersal of hydrothermal plumes from the Juan de Fuca Ridge using suspended matter compositions // J. Geophys. Res. 1992. V. 97(B3). P. 3457–3468.
- German C.R., Higgs N.C., Thomson J. et al.* A Geochemical Study of Metalliferous Sediment from the TAG Hydrothermal Mound, 26°08′ N Mid-Atlantic Ridge // J. Geophys. Res. 1993. V. 98(B6). P. 9683–9692.
- Gurvich E.G.* Metalliferous Sediments of the World Ocean. Fundamental Theory of Deep-Sea Hydrothermal Sedimentation. Heidelberg: Springer, 2006.
- Hannington M.D.* The formation of atacamite during weathering of sulfides on the modern sea floor // The Canadian Mineralogist. 1993. V. 31. P. 945–956.
- Hannington M.D., Thompson G., Rona P.A., Scott S.D.* Gold and native copper in supergene sulphides from the Mid-Atlantic Ridge // Nature. 1988. V. 333. P. 64–66.
- Kuksa Katherine, Bich Artem, Cherkashov Georgy et al.* Mass-wasting processes input in proximal metalliferous sediments: A case study of the Pobeda hydrothermal fields // Marine Geology. 2021. V. 438. 106517.
- Kuznetsov V., Cherkashov G., Kuksa K. et al.* Chronology of seafloor massive sulfides formation within the Pobeda hydrothermal cluster (Mid-Atlantic Ridge) // Geochronometria. 2020. V. 47. P. 63–70.
- Maslennikov V.V., Cherkashov G.A., Firstova A.V. et al.* Trace Element Assemblages of Pseudomorphic Iron Oxyhydroxides of the Pobeda-1 Hydrothermal Field, 17°08.7′ N, Mid-Atlantic Ridge: The Development of a Halmyrolysis Model from LA-ICP-MS Data // Minerals. 2023. V. 14(4). P. 1–29.
- Metz S., Trefry J.H., Nelsen T.* History and geochemistry of a metalliferous sediment core from the Mid-Atlantic Ridge at 26° N // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. V. 52(10). P. 2369–2378.
- Mills R.A., Elderfield H.* A dual origin of the hydrothermal component in a metalliferous sediment core from the Mid-Atlantic Ridge // J. Geophys. Res. 1993. V. 98(B6). P. 9671–9681.
- Mottl M.J., McConachy T.F.* Chemical processes in buoyant hydrothermal plumes on the East Pacific Rise near 21° N // Geochim. Cosmochim. Acta. 1990. V. 54(7). P. 1911–1927.
- Mozgova N.N., Borodaev Yu.S., Gablina I.F. et al.* Mineral assemblages as indicators of the maturity of oceanic hydrothermal sulfide mounds // Lithology and Mineral Resources. 2005. V. 40. № 4. P. 293–319.
- Rudnitsky M.D., Elderfield H.* Chemical model floating and neutral floating plume over the vent field TAG, 26° N, Mid-Atlantic ridge // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 2939–2957.
- Yund R., Kullerud G.* Thermal stability of assemblages in the Cu–Fe–S system // Y. Petrology. 1966. V. 7. Pt. 3. P. 454–488.

Mineral Indicators of Hydrothermal Activity in the Surface Layer of Bottom Sediments of the Pobeda Hydrothermal Cluster (17°44.9'–17°07.6' N MAR)

A. D. Lyutkevich^{1,*}, I. F. Gablina¹, E. V. Narkevsky², I. G. Dobretsova², A. A. Kiselev¹, N. V. Gor'kova¹

¹Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

²Stock Venture "Polar Marine Geosurvey Expedition" (PMGE), Pobedy str., 24, Lomonosov, St. Petersburg, 198412 Russia

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

The work is devoted to the study of ore minerals of the surface horizon of ore-bearing sediments of the Pobeda hydrothermal cluster. The following methods were used: optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray spectral microanalysis. It was found that ore minerals are represented by fragments of copper and iron sulfides (isocubanite, chalcopyrite, and pyrite), newly formed iron hydroxides, and atacamite. In addition, barite and edaphogenic material in the form of silicate clasts, sometimes with sulfide inclusions, are present. Structural and morphological types of iron hydroxides are distinguished. On the basis of hydrophysical data, the location of the assumed active hydrothermal source in the area of the Pobeda-3 ore occurrence was updated. The distribution of studied minerals depending on the location relative to active hydrothermal vents is described. A decrease in the size and amount of hydrothermal mineral clasts and edaphogenic material and an increase in the degree of sulfide replacement by iron hydroxides were observed at a distance from the sources. Also, a decrease in the Cu/Fe ratio in the chemical composition of copper and iron sulfides is observed when moving away from the source. An unidentified phase of $\text{Cu}_{3.57-4.22}\text{Fe}_{1.71-2.19}\text{S}_{4.99-5.31}$ with lamellae of chalcopyrite inclusions was established in the surface horizon of the column at 37L245g.

Keywords: Mid-Atlantic Ridge, Pobeda hydrothermal cluster carbonate metal-bearing and ore-bearing bottom sediments, mineral composition, copper and iron sulfides, iron hydroxides.