



УДК 549.761.34 : 550.42 : 553.435 (261.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-5

ОБОГАЩЕНИЕ БАРИТОМ РУД СУЛЬФИДНОГО УЗЛА СЕМЕНОВ, СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ: РЕЗУЛЬТАТ ВОВЛЕЧЕНИЯ БАЗАЛЬТОВ ТИПА E-MORB И МАГМАТИЧЕСКОГО ГАЗА

И.Ю. Мелекесцева¹, Г.А. Третьяков¹, В.Е. Бельтнев²

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 45637 Россия; telekestseva-irina@yandex.ru

² ФГБУ ВНИИОкеангеология, Английский пр. 1, г. Санкт-Петербург, 190121 Россия

Статья поступила в редакцию 00.00.2024 г., после доработки 00.00.2024 г., принята к печати 00.00.2024 г.

Аннотация. В работе приведен обзор и сравнительный анализ находок барита на гидротермальных полях срединно-океанических хребтов. Рассмотрено его генетическое значение для гидротермального сульфидного узла Семенов, связанного с внутриокеаническим комплексом (ВОК) 13°30' с.ш. Срединно-Атлантического хребта. Руды полей Семенов-1, -3 и -4 обогащены баритом (до 20 об. %) и, соответственно, Ва (до 4.12 мас. %). Присутствие значимых количеств барита и высокие содержания Ва в рудах гидротермальных полей ВОК является индикатором связи рудообразования с базальтами E-MORB, а также магматического вклада в минералообразование. На это в рудах узла Семенов указывают отрицательные значения изотопного состава S сульфидов, ассоциирующих с баритом, присутствие пиков магматических газов (CO₂ и SO₂) в рамановских спектрах флюидных включений в барите, а также результаты физико-химического моделирования, подтверждающие образование барит-сульфидной ассоциации при взаимодействии базальта E-MORB, морской воды и магматического газа. Результаты моделирования системы с кислыми породами показывают, что океанские плагиограниты из структур ВОК также могут быть дополнительными поставщиками Ва.

Ключевые слова: базальты E-MORB, барит, внутриокеанический комплекс, габброиды, гидротермальное поле, Срединно-Атлантический хребет, срединно-океанический хребет, сульфиды, ультрамафиты.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам АО ПМГРЭ (г. Ломоносов, Санкт-Петербург, Россия) за возможность участия в 30-м рейсе НИС «Профессор Логачев» в 2007 г. и отбора образцов для исследований, а также рецензенту, чьи ценные замечания позволили улучшить текст рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. И.Ю. Мелекесцева – разработка концепции, визуализация, написание черновика и редактирование финального варианта рукописи; Г.А. Третьяков – экспериментальные работы, редактирование финального варианта рукописи; В.Е. Бельтнев – визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Мелекесцева И.Ю., Третьяков Г.А., Бельтнев В.Е. Обогащение баритом руд сульфидного узла Семенов, Срединно-Атлантический хребет: результат вовлечения базальтов типа E-morb и магматического газа. Минералогия, **10**(4), 0–00. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-5.

ENRICHMENT OF MASSIVE SULFIDES FROM THE SEMENOV HYDROTHERMAL CLUSTER (MID-ATLANTIC RIDGE) IN BARITE: A RESULT OF E-MORB INVOLVEMENT AND MAGMATIC CONTRIBUTION

I.Yu. Melekestseva¹, G.A. Tret'yakov¹, V.E. Beltenev²

¹ South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass

² VNIIOkeangeologiya, Angliyskiy pr. 1, St. Petersburg, 190121 Russia

Received 00.00.2024, revised 13.05.2024, accepted 00.00.2024

Abstract. The paper reviews and compares the barite findings in hydrothermal fields of the mid-oceanic ridges. Its genetic significance is considered for the Semenov hydrothermal sulfide cluster related to an oceanic core complex (OCC) at 13°30' N of the Mid-Atlantic Ridge. Massive sulfides of the Semenov-1, -3, and -4 fields are enriched in barite (up to 20 vol %) and therefore Ba (up to 4.12 wt %). The presence of a significant amount of barite and a high Ba content of massive sulfides of the OCC-related fields link their formation with E-MORBs, as well as indicate magmatic contribution to mineral formation. In Semenov massive sulfides, this is also evident from negative values of S isotopic composition of sulfides associated with barite, the presence of magmatic gases (CO₂ and SO₂) in Raman spectra of fluid inclusions in barite, and the results of physico-chemical modeling, which support the formation of barite-sulfide assemblage upon the interaction of E-MORBs, seawater, and magmatic gas. The results of modeling of the system with felsic rocks show that oceanic plagiogranites from OCC structure could be an additional supplier of Ba.

Keywords: E-MORB type basalt, barite, oceanic core complex, gabbroid, hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, mid-oceanic ridge, sulfides, ultramafic rocks.

Funding. This work was supported by state contract no. 122031600292-6.

Acknowledgments. We are grateful to colleagues from JSC PMGE (Lomonosov, St. Petersburg, Russia) for the possibility of participation in the 30th cruise of *R/V Professor Logatchev* in 2007 and a reviewer for valuable comments allowing us to significantly improve the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. I.Yu. Melekestseva – conceptualization, vizualization, writing – original draft, writing – review & editing; G.A. Tret'yakov – experimental work, writing – review & editing; V.E. Beltenev – vizualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Beltenev V.E. Enrichment of massive sulfides from the Semenov hydrothermal cluster (Mid-Atlantic ridge) in barite: a result of E-morb involvement and magmatic contribution. *Минералогия*, **10**(4), 0–00. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-3-5.

ВВЕДЕНИЕ

Барит является одним из распространенных минералов современных гидротермальных сульфидных полей (ГСП), однако его количество варьирует в зависимости от их геологической позиции. Его наибольшее содержание характерно для ГСП, связанных с островодужными обстановками, которые характеризуются бимодальным вулканизмом с высоко дифференцированными кислыми вулканическими породами как на океанической, так и на континентальной коре (трог Окинава, задуговой бассейн Манус, пролив Брансфилд, вулкан Бразерс и др.) (Halbach et al., 1993; Fouquet et al., 1993; Petersen et al., 2004; de Ronde et al., 2011), а также с горячими точками или базальтами типа E-MORB (поля Лаки Страйк и Менез Гвен в Центральной Ат-

лантике, минерализация подводного вулкана Лоихи на Гавайях) (Langmuir et al., 1997; Богданов и др., 2006а; Леин и др., 2010; Davis et al., 2003). В рудах ГСП, связанных с базальтами типа N-MORB или ультрамафитами в срединно-океанических хребтах (COX), барит чаще всего является редким минералом или отсутствует (см. обзор Fouquet et al., 2010). Исключением являются, например, поля Вокан на базальтах N-MORB в хребте Карлсберг (Индийский океан) или Рейнбоу-2, а также некоторые поля узла Семенов, связанные с внутриокеаническими комплексами (ВОК) (Fouquet et al., 2010; Melekestseva et al., 2014, 2018). Присутствие обильного барита в рудах полей, ассоциирующих с ВОК, ставит вопрос о причинах его образования, поскольку ультрамафиты обеднены Ba. В статье приведен обзор находок барита на гидротермальных полях (включая

некоторые не сульфидные) СОХ и обсуждается его генетическое значение для ГСП, связанных с ВОК 13°30' с.ш. Срединно-Атлантического хребта (САХ).

ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ ВОК 13°30' С.Ш. САХ И УЗЛА СЕМЕНОВ

ВОК, широко распространенные в медленно- и ультрамедленно-спрединговых хребтах, включая САХ, выводят на поверхность морского дна породы габбро-перидотитового комплекса по крупным пологим разломам (детachment) и характеризуются сложным геологическим строением (Escartín et al., 2008; MacLeod et al., 2009). В настоящее время известно более десяти ГСП на структурах ВОК Атлантического, Индийского и Северного Ледовитого океанов (Багуев и др., 1995; Fouquet et al., 1998; Snow et al., 2001; Beltenev et al., 2003; Koschinsky et al., 2006; Beltenev et al., 2007, 2009; Бельтнев и др., 2012, 2016ф; Choi et al., 2021, 2023; Ding et al., 2022; Маковиц и др., 2023; Liang et al., 2023; Yang et al., 2023; Li et al., 2024).

ВОК 13°30' с.ш. САХ находится между трансформными разломами Зеленого мыса и Марафон (рис. 1а) и представляет собой подводную гору в западном борту рифтовой долины САХ, вытянутую в субширотном направлении примерно на 10 км при ширине около 4.5 км с относительным превышением 850 м (рис. 1б) (Beltenev et al., 2007; MacLeod et al., 2007). ВОК состоит из нескольких структурных доменов (с запада на восток): 1) хаотического террейна (*chaotic terrain* – область между лежащим ограничением detachment (*footwall cutoff*) и поверхностью со штриховкой), 2) поверхности со штриховкой (*corrugated surface*), параллельной спредингу, и 3) висячим ограничением detachment (*hanging wall cutoff*) (места, где поверхность со штриховкой появляется из-под морского дна) (рис. 1в) (Escartín et al., 2017).

К структуре ВОК 13°30' с.ш. приурочен гидротермальный сульфидный узел Семенов, открытый в 2007 г. в 30-м рейсе НИС «Профессор Логачев» (Beltenev et al., 2007, 2009). Узел состоит из пяти ГСП, вытянутых в широтном направлении вдоль зоны повышенной тектонической проницаемости с субвертикальным падением (Перцев и др., 2012). В районе ВОК подняты гидротермально-измененные перидотиты, габброиды, базальты, долериты, плагиограниты, диориты и тоналиты. К этой же зоне пространственно приурочена значительная часть находок свежих лав и выходы кремнекислых

пород. Ряд выходов малоизмененных базальтовых лав со свежими вулканическими стеклами относится к наложенным на ВОК вулканическим структурам, а выходы долеритов – к фрагментам вулканических подводных каналов, вероятно, разрозненных дайковых роев. Часть базальтов, ассоциирующихся с гидротермальными рудными полями (по крайней мере, с полем Семенов-4), по-видимому, относится к структуре висячего бока высокоамплитудного сдвига и связана с доразломной магматической аккрецией (Перцев и др., 2012).

Поле Семенов-1 расположено у подножия горы на глубинах 2570–2620 м и представляет собой один холм (Beltenev et al., 2007). В районе поля драгированы серпентинизированные перидотиты и гидротермально-измененные базальты. Сульфидный материал представлен колломорфными и массивными марказит-пиритовыми рудами (Melekestseva et al., 2014). Главные минералы руд – пирит, марказит, барит, опал; второстепенные и редкие – сфалерит, халькопирит, изокубанит, галенит, пирротин, самородное золото, уранинит, гессит, ленаит, минерал состава Cu–Ag–Sb–S, гематит, ярозит.

Поле Семенов-2 расположено на склоне горы на глубинах 2480–2750 м (Beltenev et al., 2007). В районе поля драгированы серпентинизированные перидотиты и гидротермально-измененные базальты. Здесь выявлены две зоны активности с трубами черных курильщиков и гидротермальной фауной (Beltenev et al., 2009). Руды поля Семенов-2 – медно-цинковые. Главные минералы – халькопирит, изокубанит, вюртцит, опал; второстепенные – сфалерит, марказит, пирит, ковеллин, яроуит; редкие – галенит, пирротин, самородное золото, гессит, барит, арагонит, мелонит, теллурувисмутит, гессит, алтаит, калаверит, тетраэдрит, клаусталит, науманнит, аурустибит, кобальтин (Melekestseva et al., 2017; Firstova et al., 2019).

Поле Семенов-3 расположено на глубине 2400–2600 м и связано с базальтами ВОК; в 2007 г. опробовано на склоне горы драгой, которая подняла сульфидные брекчии (Beltenev et al., 2007). Главные минералы руд – пирит, марказит, кварц, барит; второстепенные – халькопирит, гематит; редкие – борнит, сфалерит, пирротин, ковеллин, ярозит, фаза HgS (Melekestseva et al., 2018).

Поле Семенов-4 ассоциирует с базальтами и находится на глубинах 2580–2950 м на склоне и у подножия горы (Beltenev et al., 2007). Сульфиды слагают протяженные тела, подразделяемые на северную и южную группы и разделенные между со-

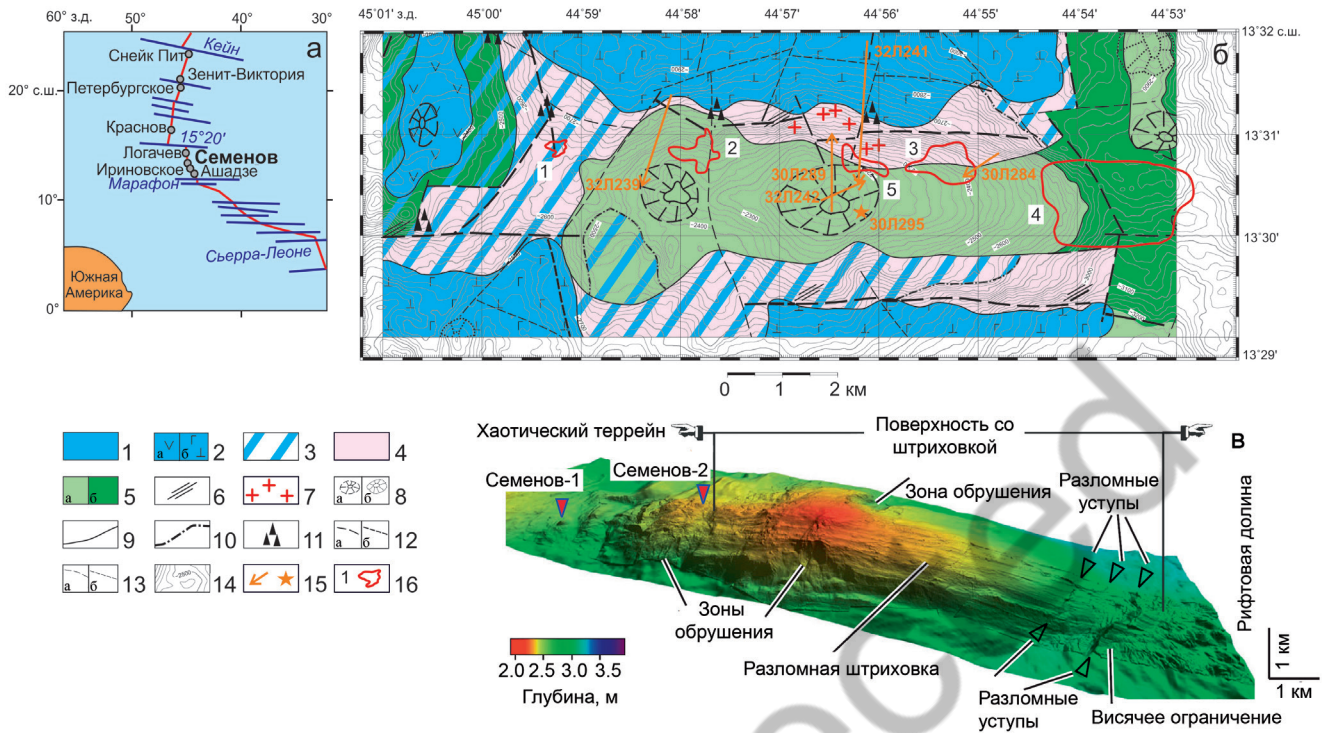


Рис. 1. Положение гидротермального узла Семенов в Срединно-Атлантическом хребте (черным и синим обозначены гидротермальные сульфидные узлы и трансформные разломы, соответственно) (а), схематическая геологическая карта района ВОК 13°30' с.ш. с расположением гидротермальных сульфидных полей, с упрощениями и дополнениями по неопубликованным материалам ПМГРЭ, 2010 (б) и структурные домены ВОК 13°30' с.ш. на трехмерном микробатиметрическом изображении, с изменениями и дополнениями по (Escartín et al., 2017) (в).

1 – Верхнеплейстоценовые–голоценовые кокколито-фораминиферовые илы; 2 – предполагаемые выходы базальтов (а) и габбро и перидотитов (б) под осадками; 3 – выходы пород, покрытые осадками; 4 – габбро, перидотиты; 5 – верхнеплейстоценовые–голоценовые (а) и среднеплейстоценовые (б) базальты; 6 – дайки долеритов и долеритобазальтов (внемасштабный знак); 7 – места обнаружения кварцевых диоритов, роговообманковых плагиогранитов (внемасштабный знак); 8 – установленные (а) и предполагаемые (б) вулканы центрального типа; 9 – геологические границы; 10 – границы выходов пород, частично покрытых осадками; 11 – участки с тектоническими брекчиями; 12 – крупно-амплитудные разломы: доказанные (а) и предполагаемые под осадками (б); 12 – мелко-амплитудные разломы (сбросы, сдвиги): доказанные (а) и предполагаемые под осадками (б); 14 – изобаты (через 25 м); 15 – пути драг (стрелки) и место отбора ТВ-грейфером (звезда) и номера станций опробования; 16 – номера гидротермальных полей узла Семенов и их контуры.

Fig. 1. Position of the Semenov hydrothermal cluster in the Mid-Atlantic Ridge (hydrothermal sulfide fields and transform faults are typed in black and blue, respectively) (a), schematic geological map of the area of the OCC at 13°30' N with location of hydrothermal sulfide fields, modified after unpublished materials of Polar Marine Geosurvey Expedition, 2010 (б), and structural domains of the OCC at 13°30' N on 3-D microbathymetric image, modified after (Escartín et al., 2017) (в).

1 – Upper Pleistocene–Holocene coccolith-foraminifera silt; 2 – inferred basalt (a) and gabbro and peridotite (б) below sediments; 3 – primary rocks partly covered by sediments; 4 – gabbro, peridotite; 5 – Upper Pleistocene–Holocene (а) and Middle Pleistocene (б) базальты; 6 – dikes of dolerite and dolerite-basalt (not to scale); 7 – quartz diorite, hornblende plagiogranite (not to scale); 8 – proven (а) and inferred (б) central-type volcanoes; 10 – geological boundaries; 10 – boundaries of primary rocks partly covered by sediments; 11 – areas with tectonic breccia; 12 – high-amplitude faults: proven (а) and inferred below sediments (б); 12 – low-amplitude faults (normal faults, strike-slip faults): proven (а) and inferred below sediments (б); 14 – isobaths (after 25 m); 15 – dredge hauls (arrows) and TV grab sampling place (star) and numbers of sampling stations; 16 – numbers of hydrothermal fields of the Semenov cluster and their contours.

бой выходами коренных пород. Сульфиды, поднятые в 2007 г., представлены массивными прожилково-вкрапленными пиритовыми рудами в гидротермально-измененных базальтах (Мелекесцева и др., 2010). Главный минерал руд – пирит; второстепен-

ные – барит, кварц; редкие – халькопирит, марказит, сфалерит, пирротин, гематит, ковеллин.

Поле Семенов-5 располагается на глубинах 2160–2340 м и связано с гидротермально-измененными базальтами и ультрамафитами (Beltenev et

al., 2009). На поле драгированы массивные марказит-пиритовые и прожилково-вкрапленные халькопирит-пиритовые руды. Главные минералы руд – пирит, халькопирит; второстепенные – марказит, кварц, гематит; редкие – пирротин, изокубанит, сульфиды меди, сфалерит, хромит, барит, гетит, лепидокрокит (Firstova et al., 2022).

БАРИТ В РУДАХ ПОЛЕЙ УЗЛА СЕМЕНОВ

В марказит-пиритовых рудах поля Семенов-1 установлено до 20 об. % барита (Beltenev et al., 2007; Иванов и др., 2008). Барит образует агрегаты зональных таблитчатых кристаллов или радиально-лучистые агрегаты размером до 0.5 см, на которые нарастают пирит, марказит и опал (рис. 2а, б). Барит содержит включения галенита и, редко, самородного золота. В сульфидных брекчиях поля Семенов-3 барит слагает таблитчатые кристаллы размером до 1 мм и заполняет в виде щеток и друз пространство между сульфидными обломками в цементе брекчий (рис. 2в, г). Местами ассоциирует с поздним халькопиритом. В образцах поля Семенов-4 барит образует радиальные сростки из таблитчатых кристаллов, располагающиеся в интерстициях между сульфидами и в трещинах (рис. 2д). В рудах поля Семенов-2 барит встречается редко и нарастает на сульфиды и опал в виде таблитчатых кристаллов размером около 0.5 мм в размере, формирующими радиально-лучистые агрегаты (рис. 2е) (Melekestseva et al., 2017). На поле Семенов-5 редкий барит обнаружен в пористых массивных пиритовых рудах ст. 372, а в рудах ст. 373 его визуальное количество оценивалось до 20 об. % (Firstova et al., 2022).

Содержания Ва в рудах полей Семенов сильно варьирует (табл. 1). В рудах поля Семенов-1 его количество составляет от 0.46 до 3.48 мас. % (среднее – 1.12 мас. %, медиана – 0.60 мас. %). В сульфидных брекчиях поля Семенов-3 содержание Ва сходно с таковым на поле Семенов-1: 0.53–4.12 мас. % (среднее – 1.80 мас. %, медиана – 0.88 мас. %). Содержание Ва составляет 0.27–1.96 мас. % в массивных пиритовых рудах поля Семенов-4 и 0.11–0.95 мас. % – в прожилково-вкрапленных рудах. Максимальное содержание Ва в рудах поля Семенов-2 составляет 0.44 мас. %. Содержание Ва в пиритовых рудах поля Семенов-5 ст. 372 составляет 1220–11900 г/т (среднее из трех анализов – 7003 г/т, медиана – 7890 г/т, расчет по данным табл. 7 (Firstova et al., 2022)) и в рудах ст. 373 – 20–33510 г/т (среднее из пяти анализов – 12196 г/т, медиана – 6200 г/т) расчет по дан-

ным табл. 7 (Firstova et al., 2022)). Содержание Ва в массивных рудах, контактирующих с измененными ультрамафитами, составляет 3–236 г/т (среднее из десяти анализов – 43 г/т, медиана 15.5 г/т).

БАРИТ В РУДАХ ДРУГИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СОХ

Барит является одним из главных минералов руд ГСП, ассоциирующих с базальтами типа E-MORB, и редок на полях, ассоциирующих как с базальтами N-MORB, так и с ультрамафитами (табл. 2). В отличие от сульфидных полей САХ, многочисленный барит известен практически на всех полях, ассоциирующих с базальтами ультрамедленно-спрединговых хребтов Северного Ледовитого океана. В СОХ Тихого океана барит является главным и второстепенным минералом ГСП, связанных с промежуточно-спрединговыми хребтами, большая часть которых покрыта осадками (хребты Эксплорер, Хуанде-Фука и Горда, рифт Гуаймас), и крайне редок на ГСП быстро-спредингового Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП). Ниже приведены краткие сведения о распространенности барита и содержании Ва в образцах полей СОХ (поля указаны в географическом порядке с севера на юг для каждого хребта, их координаты приведены в табл. 2).

Поля, ассоциирующие с базальтами

Атлантический океан. На поле Стейнахол (*Steinahóll*) (хребет Рейкьянес, северная часть САХ) барит вместе с кремнеземом образует плиты, которые являются основанием для ангидритовых труб и подстилаются пирит-марказитовыми слоями (Taylor et al., 2021).

На поле Лаки Страйк (*Lucky Strike*) (САХ) барит образует гребни с небольшим количеством пирита, марказита и сфалерита (Langmuir et al., 1997). Он также присутствует в халькопиритовых и марказитовых трубах, где заполняет интерстиции в виде агрегатов кристаллов размером до 3 мм. Содержание Ва в рудах поля колеблется от 9.1 в трубах до 39.7 мас. % в гребневых постройках (среднее из трех анализов 21.23 мас. %, медиана – 14.9 мас. %, расчет по данным (Богданов и др., 2006а, табл. 1)).

На поле Менез Гвен (*Menez Gwen*) (САХ) баритом обогащены плоские холмы вокруг небольших ангидритовых труб (Fouquet et al., 1994). Барит также присутствует в составе барит-сульфидных труб и в виде обломков в вулканомиктовых граве-

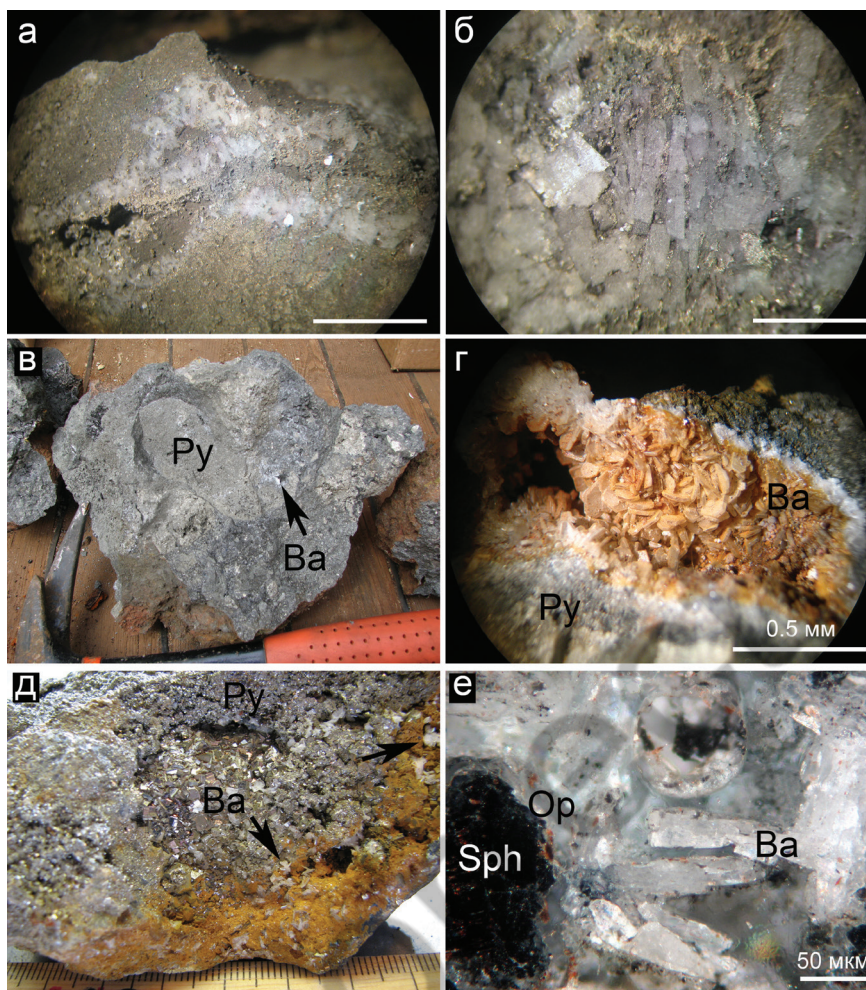


Рис. 2. Барит (Ba) в рудах полей гидротермального узла Семенов: а, б – жильные и гнездовые агрегаты пластинчатых кристаллов барита в марказит-пиритовых рудах поля Семенов-1 (масштаб 0.5 мм, под бинокляром); в – гнезда барита в пиритовых (Py) брекчиях поля Семенов-3, макрофото; г – друза кристаллов барита, покрытых гидроокислами Fe, в пиритовых брекчиях поля Семенов-3, фото под бинокляром; д – сростки пластинчатых кристаллов барита в пиритовой руде поля Семенов-4, макрофото; е – таблитчатые кристаллы барита, нарастающие на сфалерит и опал (Op), в медно-цинковых рудах поля Семенов-2 (Sph) отраженный свет, темнопольное изображение.

Fig. 2. Barite (Ba) in massive sulfides of the Semenov hydrothermal cluster: а, б – vein and pocket aggregates of platy barite crystals in marcasite-pyrite ores of the Semenov-1 field (scale bar is 0.5 mm, binocular images); в – barite pockets in pyrite (Py) breccias of the Semenov-3 field, macrophoto; г – druse of barite crystals covered by Fe oxyhydroxides in pyrite breccias of the Semenov-3 field, binocular image; д – intergrowths of platy barite crystals in pyrite ore of the Semenov-4 field, macrophoto; е – tabular barite crystals overgrowing sphalerite (Sph) and opal (Op) in Cu-Zn massive sulfides of the Semenov-2 field, reflected light, dark-field image.

литах (Леин и др., 2010). Содержание Ba в образцах варьирует от 0.07 до 37.6 мас. % (среднее из восьми анализов – 16.85 мас. %, медиана – 15.56 мас. %, расчет по данным (Леин и др., 2010, табл. 1)).

На поле Брокен Спур (*Broken Spur*) (СХХ) редкий барит установлен в рудах с дисульфидами Fe из основания труб курильщиков (Duckworth et al., 1995). Содержание Ba в образцах варьируют от <200 до 670 г/т (среднее из 17 анализов – 276 г/т, медиана – 240 г/т, расчет по данным (Богданов и др., 2006б, табл. 1)).

На поле ТАГ (*TAG*) (СХХ) интерстициальные радиальные сростки барита найдены в пирит-халькопиритовых брекчиях постройки Рона (*Rona*), а также в подповерхностных массивных сульфидах постройках Саусерн (*Southern*), Нью Маунд (*New Mound*) и Шинкай (*Shinkai*) (Lehrmann et al., 2018). По данным (Petersen et al., 2000), содержание Ba в образцах из активной постройки ТАГ, которая находится в 2 км юго-западнее вышеуказанных построек и где барит не описан, варьирует от <30 до 560 г/т (среднее – 75 г/т, медиана – 80 г/т).

Таблица 1

Содержание Ва в сульфидных рудах гидротермальных полей узла Семенов

Table 1

Ba content of massive sulfides from hydrothermal fields of the Semenov cluster

Поля узла Семенов	Содержание Ва, мас. %	Источник
1	$\frac{0.46-3.48}{1.12 (0.60)}$	Melekestseva et al., 2014
2	$\frac{<0.08-0.44^*}{<0.15 (<0.08)}$	Melekestseva et al., 2017
3	$\frac{0.53-4.12}{1.80 (0.88)}$	Melekestseva et al., 2018
4	$\frac{0.27-1.96}{0.11 (0.33)}$	неопубликованные данные ПМГРЭ
5	$\frac{<3-35510^{**}}{4579-51}$	Firstova et al., 2022

Примечание. Числитель – разброс содержаний, знаменатель – среднее и медиана (в скобках); * – пересчитано из содержания ВаО; ** – содержание в г/т.

Note. Nominator – dispersion of contents, denominator – average and median (in brackets); * – recalculated from original ВаО content; ** – content in ppm.

Сульфидные руды поля Краснов (СХ) содержат 0.26 мас. % Ва, а барит и гидроксиды Fe составляют 70% песчаной фракции донных осадков, указывая на разрушение баритсодержащих руд (Cherkashev et al., 2008).

Барит распространен в рудах поля Петербургское (СХ) (Габлина и др., 2012). В массивных марказит-пиритовых и пиритовых брекчиях барит встречается на сульфидах в виде прозрачных таблитчатых часто зональных кристаллов и их сростков (Мелекесцева и др., 2014). Содержание Ва в рудах варьирует от 8 до 1500 г/т (среднее из 23 анализов – 306 г/т, медиана – 48 г/т; неопубликованные авторские данные).

Северный Ледовитый океан. Обильный барит в ассоциации со сфалеритом и опалом слагает трубы на поле Скуид Форест (*Squid Forest*) (хребет Колбенси), расположенном на вершине вулканической постройки (Pedersen et al., 2010). Трубы белых курильщиков поля Тролльвеген (*Trollwegen*) (хребет Монса) состоят из ангидрита, барита, сфалерита и пирита (Pedersen et al., 2010). На соседнем поле Сория Мория (*Soria Moria*) трубы сложены баритом и кремнеземом и редкими пиритом, сфалеритом и галенитом (Pedersen et al., 2010). На поле Локис Касл (*Loki's Castle*) (хребет Монса) барит слагает трубы высотой около 1 м на восточном фланге поля (Pedersen et al., 2010; Eickmann et al., 2014). На поле Аврора (*Aurora*) (хребет Гаккеля) барит является главным нерудным минералом в трубах курильщиков, состоящих из халькопирита, пирита и сфалерита (Ramirez-Llodra et al., 2023).

На поле Севен Систерс (*Seven Sisters*), ассоциирующем со щелочными ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 3.8$ мас. %) базальтами (хребет Колбенси), барит является главным нерудным минералом и замещается пиритом (Marques et al., 2020). Содержание Ва в образцах достигает 43.8 мас. % (среднее из 6 анализов 19.3 мас. %, медиана – 10.5 мас. %, расчет по данным из табл. 2 без учета пробы глинистых осадков (Marques et al., 2020)). Редкий барит упоминается в рудах поля Колбенси (*Kolbeinsey*) в одноименном хребте (Fouquet et al., 2010).

Индийский океан. На поле Эдмонд (*Edmond*) (Центрально-Индийский хребет) барит слагает ~2% в массивных марказит-пиритовых рудах и ~5% – в пирит-сфалеритовых трубах (Cao et al., 2018). Содержания Ва варьируют от 14–18 г/т в пирит-марказитовых рудах до 15–1396 г/т в пирит-сфалеритовых трубах (среднее по всей выборке для 7 анализов – 887 г/т, медиана – 1285 г/т, расчет по данным (Cao et al., 2018, табл. 6)). Хотя барит не отмечен в составе марказит-пирит-ангидритовых образцов, они содержат самые высокие концентрации Ва (1537–1943 г/т).

На поля Зонне (*Sonne*) (Центрально-Индийский хребет) барит установлен в поздней ассоциации с гипсом и пиритом в существенно халькопиритовых трубах, а также в сфалерит-содержащих яшмоидных брекчиях, где он является главным нерудным минералом (Halbach et al., 1998). Наименьшие содержания Ва установлены в халькопиритовых трубах (<100–400 г/т), промежуточные – в пирит-марказитовых трубах (200–1100 г/т) и наи-

Таблица 2

Распространенность барита среди нерудных минералов в гидротермальных полях срединно-океанических хребтов

Table 2

Occurrence of barite among gangue minerals of the MOR hydrothermal fields

Поля	Координаты	Вмещающие породы	Распространенность барита	Содержание Ba	Источник
СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН					
Хребет Гаккеля					
Аврора	82°53'49" с.ш., 6°15'21" з.д.	Базальты	+++	–	Ramirez-Llodra et al., 2023
Хребет Монса					
Троллвеген	71° с.ш., 5°76' з.д.	Щелочные базальты ¹	+++	–	Pedersen et al., 2010
Сория Мория	71° с.ш., 5°81' з.д.	Щелочные базальты ¹	+++	–	Pedersen et al., 2010
Локис Касл	73°30' с.ш., 8° в.д.	Базальты N-MORB ¹	+++	–	Pedersen et al., 2010
Хребет Колбенси					
Севен Систерс	71°15' с.ш., 12°79' з.д.	Щелочные базальты	+++	6.29–43.8 мас. %	Marques et al., 2020
Скуид Форест	68°56' с.ш., 17°12' з.д.	Базальты	+++	–	Pedersen et al., 2010
Колбенси	67°05' с.ш., 18°42' з.д.	Базальты	+	–	Fouquet et al., 2010
АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАН					
Срединно-Атлантический хребет					
Стейнахол	63°6' с.ш., 24°32' з.д.	Базальты	+++	–	Taylor et al., 2021
Лаки Страйк	37°17' с.ш., 32°16' з.д.	Базальты E-MORB	+++	9.1–39.7 мас. %	Langmuir et al., 1997; Богданов и др., 2006а
Менез Гвен	37°50' с.ш., 31°31' з.д.	Базальты E-MORB	+++	0.07–37.6 мас. %	Fouquet et al., 1994; Леин и др., 2010
Рейнбоу	36°23' с.ш., 33°90' з.д.	Ультрамафиты	+	687 г/г ²	Леин и др., 2003
Рейнбоу-2	36°23' с.ш., 33°90' з.д.	Ультрамафиты (?)	+++	16.20 мас. % ³	Fouquet et al., 2010
Брокен Спур	29°10' с.ш., 43°10' з.д.	Базальты N-MORB	+	<200–670 г/г	Duckworth et al., 1995 Богданов и др., 2006б
ТАГ	26°08' с.ш., 44°49' з.д.	Базальты N-MORB	+	–	Lehrmann et al., 2018
Петербургское	19°52' с.ш., 45°86' з.д.	Базальты N-MORB	+	8–1500 г/г ²	Габлина и др., 2012
Победа-1	17°08.7' с.ш., 46°23.44' з.д.	Ультрамафиты	+	–	Amplieva et al., 2017; Габлина и др., 2018

Поля	Координаты	Вмещающие породы	Распространенность барита	Содержание Ba	Источник
Победа-3	17°08.3' с.ш., 46°25.20' з.д.	Ультрамафиты	+	-	
Краснов	16°38' с.ш., 46°28' з.д.	Базальты N-MORB	+(?)	0.26 мас. %	Черкашев и др., 2013
Логачев	14°75' с.ш., 44°97' з.д.	Ультрамафиты	+(?)	<100 г/т (Л-1), 1491 г/т (Л-2) ³	Краснов et al., 1995; Леин и др., 2003
Семенов-1	13°30.87' с.ш., 44°59.24' з.д.	Базальты от N-MORB до E-MORB /ультрамафиты	+++	0.46–3.48 мас. %	Melekestseva et al., 2014
Семенов-2	13°31.13' с.ш., 44°59.03' з.д.		+	<0.10–0.49 мас. %	Melekestseva et al., 2017
Семенов-3	13°30.70' с.ш., 44°55.00' з.д.		+++	0.53–4.12 мас. %	Melekestseva et al., 2018
Семенов-4	13°30.24' с.ш., 44°54.07' з.д.		++	0.12–2.19 мас. %	Мелекестева и др., 2010
Семенов-5	13°30.7' с.ш., 44°56.2' з.д.		+	<3–35100 г/т	Firstova et al., 2022
Срединно-Каймановый хребет					
вон Дам	18°22' с.ш., 18°47' з.д.	Ультрамафиты	+(?)	-	Connelly et al., 2012
ИНДИЙСКИЙ ОКЕАН					
Хребет Карлсберг					
Вокан	6°22' с.ш., 60°31' в.д.	Базальты N-MORB	+++	-	Wang et al., 2017
Центрально-Индийский хребет					
Кайрей	25°19' ю.ш., 70°02' в.д.	Базальты N-MORB	++	<3–561 г/т	Wang et al., 2014
Эдмонд	23°52' ю.ш., 69°35' в.д.	Базальты N-MORB	++	14–1943 г/т	Сао et al., 2018
Зонне	23°23' ю.ш., 69°14' в.д.	Базальты N-MORB	++	<100 г/т–11 мас. %	Halbach et al., 1998
Юго-восточный Индийский хребет					
Поле б/н	49°39' ю.ш.	Базальты N-MORB	+	-	Tao et al., 2011
Лунци	37°8' ю.ш., 49°6' в.д.	Базальты N-MORB	++	-	Chen et al., 2024
Поле б/н	37°39' ю.ш., 50°24' в.д.	Базальты N-MORB	+	-	Tao et al., 2014
Поле б/н	37°34' ю.ш., 50°63' в.д.	Базальты N-MORB	+	6–57 г/т	Liao et al., 2023
г. Джордан	27°85' ю.ш., 63°93' в.д.	Щелочные базальты	++	-	Nayak et al., 2014
ТИХИЙ ОКЕАН					
Хребет Эксплорер					
Мэджик Маунтин	49°75' с.ш., 130°27' в.д.	Базальты от N-MORB до E-MORB, осадки	++	-	Hannington et al., 1991; Beaudoin, 2001
Поле б/н	от 49°44' до 49°46' с.ш., от 130°16' до 130°18' в.д.	Базальты	++	-	Barrett et al., 1990

Поля	Координаты	Вмещающие породы	Распространенность барита	Содержание Ba	Источник
Хребет Хуан-де-Фука					
Миддл Вэллей	48°27' с.ш., 128°41' в.д.	Базальты, осадки	+++	до 1.2 мас. %	Goodfellow, Blaise, 1988
Саскач, Солги Дог, Хай Райз, Мейн Эндевор и Мотра	от 47°92' с.ш., 129°11' в.д. до 48°00' с.ш., 129°03' в.д.	Базальты E-MORB	+++	0.006–27.50 мас. % ⁴	Tivey, Delaney, 1986; Kristal et al., 2006; Jamieson et al., 2016
Экшал Симангт	45°57' с.ш., 130°02' в.д.	Базальты E-MORB	+++	0.05–34.4 мас. %	Hannington, Scott, 1988
Плом	44°38.6' с.ш., 130°22.4' в.д.	Базальты	++	–	Paradis et al., 1988
Нос Клефт	от 44°54.8' с.ш., 130°13' в.д. до 45° с.ш., 130°12' в.д.	Базальты	+	<30–10000 г/т	Koski et al., 1994
Разломная зона Бланко					
Поле б/н	44°21' с.ш., 129°62' в.д.	Базальты, осадки	+++	292–218000 г/т	Hein et al., 1999
Хребет Горда					
Си Клиф	42°44.7' с.ш., 126°43.7' в.д.	Базальты	+++	–	Rona et al., 1990
НЕСКА, СЕСКА	41° с.ш., 127°27' в.д.	Базальты осадки	+++	–	Zierenberg et al., 1993
Рифт Гуаймас					
Поле б/н	27°09' с.ш., 111°25' в.д.	Базальты, осадки	+++	0.0001–43.71 мас. % ⁵	Gieskes et al., 1988 Peter, Scott, 1988
Восточно-Тихоокеанское поднятие					
Поле б/н	20°80' с.ш., 109°28' в.д.	Базальты	++	15–133000 г/т	Alt, 1988
Поле б/н	20°54' с.ш., 109°03' в.д.	Базальты	+	65–6050 г/т	Zierenberg et al., 1984
Поле б/н	12°42' с.ш., 103°52' в.д.	Базальты	+	2–2100 г/т	Hekinian et al., 1983 Fouquet et al., 1988
Хребет Галапагос					
Поле б/н	0°45' с.ш., 85°50.5' в.д.	Базальты от N-MORB до E-MORB	+	–	Embley et al., 1988

Примечание. Распространенность барита среди нерудных минералов: +++ – главный, ++ – второстепенный, + – редкий; б/н – без названия; прочерк – нет данных; ¹ – тип породы указан по данным (Neumann, Schilling, 1984); ² – неопубликованные авторские данные; ³ – среднее значение; ⁴ – данные для поля Мотра (Kristal et al., 2006); ⁵ – содержание Ba пересчитано из содержания BaO в оригинальной публикации (Peter, Scott, 1988).

Note. The occurrence of barite among gangue minerals: +++ – major; ++ – subordinate; + – rare; б/н – no name; dash – no data; ¹ – the rock type is given after (Neumann, Schilling, 1984); ² – unpublished original data; ³ – the average value; ⁴ – data for the Mothra field (Kristal et al., 2006); ⁵ – the Ba content is recalculated from BaO content in original paper of (Peter, Scott, 1988).

большие – в сфалерит-содержащих брекчиях яшмоидов (4.2–11 мас. %) (среднее по всей выборке из 9 анализов – 29411 г/т, медиана – 500 г/т, расчет по данным (Halbach et al., 1998, табл. 1)).

На поле Вокан (*Wocan*) (хребет Карлсберг) барит является одним из главных нерудных минералов массивных борнит-дигенит-халькопиритовых и сфалерит-пиритовых руд (Wang et al., 2017). Он образует кластеры из таблитчатых кристаллов и радиальные агрегаты, на которые нарастают пирит, сфалерит и опал-А.

На сульфидном поле Кайреи (*Kairei*) в Центральном Индийском хребте, связанном с базальтами (Gamo et al., 2001) по одним данным или ультрамафитами (Wang et al., 2014) по другим, редкий барит обнаружен в окисленных корках на сульфидах вместе с гидроксидами Fe, купритом, атакамитом и паратакамитом (Wang et al., 2014). Содержания Ba в рудах варьируют от <3 до 24 г/т (в одном случае 567 г/т) (среднее по 23 анализам – 36.57 г/т, медиана – 13 г/т, расчет по данным (Wang et al., 2014, табл. 2)).

На поле Лонгси (*Longqi*) (Юго-восточный Индийский хребет) второстепенный барит ассоциирует с ангидритом в пиритовых и сфалеритовых трубах (Chen et al., 2024). Барит является второстепенным минералом сфалерит-халькопиритовых труб курильщиков, а также обломочных руд на г. Джордан в осевом вулканическом хребте (Юго-Восточный Индийский хребет) (Nayak et al., 2014).

На полях Юго-Восточного Индийского хребта редкий барит установлен в полностью окисленных трубах курильщиков поля 37°34' ю.ш. (Liao et al., 2023), в интерстициях между халькопиритом и пиритом в трубах курильщиков поля 49°39' ю.ш. (Tao et al., 2011) и в пористых, часто, слабо консолидированных обогащенных кремнеземом образцах с редкой вкрапленностью пирита, марказита и ангидрита поля 37°39' ю.ш. (Tao et al., 2014). Содержания Ba в оксигидроксидах Fe поля 37°34' ю.ш. варьируют от 6 до 57 г/т (Liao et al., 2023).

Тихий океан. В хребте Эксплорер второстепенный барит вместе с аморфным кремнеземом установлен в пирит-марказит-сфалеритовых курильщиках поля Мэджик Маунтин (*Magic Mountain*), ассоциирующего с базальтами, состав которых варьирует от N-MORB до E-MORB (Hannington et al., 1991; Beaudoin, 2001), а также в районе 49°44'–49°46' с.ш., 130°16'–30°18' в.д. (Barrett et al., 1990).

В районе Миддл Вэллей (*Middle Valley*) (северная часть хребта Хуан-де-Фука) рифтовая долина покрыта гемипелагическими осадками и содер-

жит кластогенные сульфидные залежи с баритом (Goodfellow, Blaise, 1988). Барит образует аутигенные розетки в матриксе гидротермально-измененных осадков, субгедральные кристаллы между интерстициями одних сульфидных обломков или сростается с кремнеземом и пиритом в других обломках. Содержание Ba в сульфидных осадках достигает 5.06 мас. %.

На поле горы Осевой (*Axial Seamount*), крупного щитового вулкана с базальтами типа E-MORB в хребте Хуан-де-Фука, барит вместе с аморфным кремнеземом, сфалеритом, вюртцитом, марказитом, халькопиритом и галенитом слагает трубы, содержание Ba в которых составляет 0.05–34.4 мас. % (среднее из 15 проб – 11.25 мас. %, медиана – 6.38 мас. %, расчет по данным (Hannington, Scott, 1988, Table 1)). На поле Плюм (*Plume*), расположенном южнее поля горы Осевой, барит образует сфероидные агрегаты и пористые таблитчатые кристаллы в пустотах внешней зоны сфалеритовых труб (Paradis et al., 1988).

В сегменте Клефт хребта Хуан-де-Фука известно поле Нос Клефт (*North Cleft*) на свежих базальтах барит встречается во внешних частях халькопиритовых труб в интерстициях между колломорфным марказитом и пиритом, в слое оксигидроксидами Fe, покрывающих трубы, внешних слоях сфалеритовых труб вместе с аморфным кремнеземом, марказитом, пиритом и оксигидроксидами Fe и внешних слоях марказит-пиритовых труб в интерстициях между главными минералами (Koski et al., 1994). Содержание Ba в образцах варьирует от 30 до 10 000 г/т (1000 г/т, в среднем).

Южнее хребет Хуан-де-Фука содержит несколько гидротермальных полей на базальтах E-MORB (Саскач (*Sasquach*), Солти Дог (*Salty Dog*), Хай Райз (*High Rise*), Мейн Эндевор (*Main Endeavor*) и Мотра (*Mothra*)) с обильным баритом в виде таблитчатых и пластинчатых кристаллов и дендритовидных агрегатов в ассоциации со сфалеритом и пиритом (Tivey, Delaney, 1986; Kristal et al., 2006; Jamieson et al., 2016).

В северной части хребта Горда барит вместе с кремнеземом цементирует брекчии, подстилающие выходы курильщиков поля Си Клиф (*Sea Cliff*) (Rona et al., 1990). В южной части хребта Горда, покрытой осадками (трог Эсканаба), на полях НЕСКА (*NESCA*) и СЕСКА (*SESCA*) барит образует трубы на поверхности сульфидных холмов, в которых сростается со сфалеритом, галенитом, марказитом, пиритом, аморфным кремнеземом и самородной серой (Koski et al., 1988; Zierenberg et al., 1993).

Он также найден в виде корок толщиной до 2 см на многих образцах пирротиновых руд и представлен радиальными сростками, пластинчатыми кристаллами, дендритовидными агрегатами. В обломочных сульфидных слоях барит находится в интерстициях между сульфидными обломками вместе с изокубанитом и сфалеритом.

В зоне трансформного разлома Бланко, который соединяет срединговые хребты Хуан-де-Фука и Горда, известно активное гидротермальное поле 44°21' с.ш., на котором барит образует холмы и трубы, штокверк в брекчиях, кремнезем-баритовые плиты, а также присутствует в осадках (Hein et al., 1999). Содержание Ва в образцах составляет 292–218 000 г/т (среднее по 31 анализу – 43 571 г/т, медиана – 7180 г/т, расчет по данным (Hein et al., 1999, Table 4)).

В южной части бассейна Гуаймас на поле 27°09' с.ш. известны баритовые постройки с аморфным кремнеземом, пропитанные нефтяным конденсатом (Gieskes et al., 1988), а также барит встречается в трубах курильщиков и образцах из сульфидных холмов, где его содержание достигает 30 об. % (Peter, Scott, 1988). Содержание Ва варьирует от 0.0001 до 43.71 мас. % (среднее по 14 анализам – 14.91 мас. %, медиана – 10.35 мас. %, расчет по данным (Peter, Scott, 1988, Table 2)).

На поле 0°45' с.ш. в хребте Галапагос, ассоциирующем с базальтами от N-MORB до E-MORB, редкий барит в виде радиальных сростков заключен в аморфном кремнеземе и частично замещен им и пиритом по краям дезинтегрированных труб (Embley et al., 1988).

На поле 20°80' с.ш. (ВТП), второстепенный барит совместно с опалом образует массивные плиты рядом с сульфидными постройками, а также ассоциирует с поздними дисульфидами Fe, иллитом, опалом и сфалеритом в запечатанных сульфидных трубах (Alt, 1988). Содержание Ва варьирует от 15 до 133 000 г/т (среднее по 6 анализам – 22 565 г/т, медиана – 132 г/т, расчет по данным из табл. 2 (Alt, 1988)).

Редкий барит в ассоциации с дисульфидами Fe и кремнеземом обнаружен на поле 12°42' с.ш. ВТП (Hekinian et al., 1983) и в сульфидах из холма на поле около 21° с.ш. ВТП (Zierenberg et al., 1984). Содержание Ва в образцах поля 12°42' с.ш. составляет 2–2100 г/т (среднее по 18 анализам – 1479 г/т, медиана – 35.5 г/т, расчет по данным (Fouquet et al., 1988, Table 6)). Содержание Ва в образцах поля ~21° с.ш. – 65–6050 г/т (среднее по 5 анализам – 1479 г/т, медиана – 225 г/т, расчет по данным (Zierenberg et al., 1984, Table 2)).

Поля, ассоциирующие с ультрамафитами

Атлантический океан. В трубах поля Рейнбоу (САХ) редкий барит отмечается во внешних гидроксидных корках, где он образует радиально-лучистые сростки между агрегатами изокубанита (Богданов и др., 2002; Леин и др., 2003). Обильный барит без детального описания упоминается в рудах поля Рейнбоу-2, которые характеризуются высокими содержаниями Ва (16.20 мас. %) и Рb (20987 г/т) (Fouquet et al., 2010). Редкий барит в виде таблитчатых кристаллов присутствует в мелкозернистой колломорфной пирит-марказит-сфалерит-изокубанит-халькопиритовой руде поля Победа-1 (САХ) и упоминается в составе металлоносных отложений вместе с оксигидроксидами Fe на поле Победа-3 (САХ) (Amplieva et al., 2017; Габлина и др., 2018). Барит без детального описания упоминается как редкий минерал в рудах поля Логачев (Krasnov et al., 1995).

На поле вон Дам (Срединно-Каймановый хребет) барит упоминается по данным рентгеноструктурного анализа в образцах из холма, сложенного тальком (Connelly et al., 2012), однако его присутствие не подтвердилось более поздними минералогическими исследованиями (Hodgkinson et al., 2015).

Индийский океан. На тальковом поле Оннури (Центрально-Индийский хребет), расположенном на поверхности ВОК в ассоциации с ультрамафитами, обильный барит найден в проксимальных донных фораминиферовых осадках, которые также содержат многочисленные обломки талька и вулканокластики (Lim et al., 2022). Содержание Ва в осадках варьирует от 466 до 41101 г/т. Барит представлен гипидиоморфными и идиоморфными таблитчатыми кристаллами размером 100–500 мкм и их радиальными сростками.

БАРИТ В РУДАХ ДРЕВНИХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Несмотря на длительную геологическую историю древних колчеданных месторождений, многие из них являются слабо метаморфизованными и сохраняют первичные текстуры и структуры (например, трубы курильщиков или оруденелую пригидротермальную фауну), а также минерализацию (колломорфный пирит, реликты изокубанита и др.) (Oudin, Constantinou, 1984; Maslennikov et al., 2017). Так же, как и современных обстановках, первичный гидротермальный барит широко распространен в рудах древних колчеданных ме-

сторождений, связанных с вулканическими бимодальными комплексами (Horikoshi, 1969; Медноколчеданные..., 1988; Barrie, Hannington, 1999). В то же время, барит полностью отсутствует в рудах месторождений, связанных с офиолитами – древними аналогами океанической коры: Ишкининское, Ивановское и Дергамышское (Южный Урал), Истен Металс (Канада), Кулак (Австралия), Лаксия ту Мавру и Певкос (Кипр), Ковбой, Мейбл и Сайксвилль (США), месторождения Апеннин, Дерни (Китай), Оутокумпу (Финляндия) (Зайков и др., 2009). На этих месторождениях среди нерудных минералов доминируют серпентин, тальк и карбонаты.

ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ультраосновных пород. Структуры ВОК чаще всего включают в себя перидотиты, с которыми напрямую связано рудообразование на таких ГСП как Логачев, Рейнбоу, Ашадзе и др. (Леин и др., 2003; Богданов и др., 2006; Fouquet et al., 2010). По данным (Fouquet et al., 2010), содержание Ва в ультрамафитах составляет 3 г/т и, очевидно, что ультрамафиты не могут быть источником этого элемента. Барит полностью отсутствует в отложениях низкотемпературных карбонатных полей на габбро-перидотитовых комплексах, образование которых связано с серпентинизацией ультрамафитов (Лост Сити, Салданья, Менез Хом) (Ludwig et al., 2006; Dias, Barriga, 2006). Серпентинизированные ультрамафиты и габброиды массива Атлантис, на котором находится карбонатное поле Лост Сити (30° с.ш. САХ), содержат 0.00–1.19 и 2.32–4.33 г/т Ва (Früh-Green et al., 2018). Низкие содержания Ва характерны для серпентинитов массива Рейнбоу, вмещающего одноименное сульфидное поле: 0.1–8.0 г/т (Marques et al., 2007; Andreani et al., 2014).

Теоретически источником Ва могут быть плагиоклазовые перидотиты, но подобные породы, описанные в САХ, не связаны ни с одним из ГСП и содержат всего 8.36 г/т Ва (Силантьев и др., 2008). Обогащение серпентинитов Ва может произойти за счет гидротермальных изменений габброидов и привнесом из них Ва, как, например, на поле Логачев, где серпентиниты содержат от 0.64 до 136.6 г/т Ва (среднее – 33.33 г/т, медиана – 14.55 г/т расчет по данным (Augustin et al., 2008, Table 3)). Однако это не проявилось в обогащении руд полей Логачев баритом.

Анализ литературы показывает, что барит не описан в рудах большинства других сульфидных полей, связанных с ультрамафитами ВОК: Ашадзе (12°38' с.ш. САХ) (Mozgova et al., 2008), Нибелунген (8°30' ю.ш., САХ) (Melchert et al., 2008), 23° ю.ш. САХ (Li et al., 2024), Ари (8°2' ю.ш.) и Чеум (12°30' ю.ш.), Центрально-Индийский хребет (Choi et al., 2021, 2023), Тянцуо (Юго-восточный Индийский хребет) (Ding et al., 2022), Тянси (3°70' с.ш., хребет Карлсберг) (Liang et al., 2023), Юхуань (37°94' ю.ш., 49°26' в.д., Юго-восточный Индийский хребет) (Yang et al., 2023). Полное отсутствие барита в древних колчеданных месторождениях, связанных с ультрамафитами, является дополнительным аргументом в пользу того, что габбро-перидотитовые комплексы не являются продуктивными для формирования барита и сопутствующей сульфидной минерализации.

Влияние основных пород. В океанических обстановках гидротермального минералообразования источником Ва, главным образом, является плагиоклаз вулканических пород (Hannington et al., 1995). Обогащение Ва и развитие барита в рудах таких полей САХ, как Лаки Страйк и Менез Гвен, связывается с их ассоциацией с базальтами типа E-MORB, которые обогащены несовместимыми элементами (K, Rb, Sr, Ba) в результате влияния Азорской горячей точки (Langmuir et al., 1997). По данным указанных авторов, если базальтовый субстрат содержит меньше 20 г/т Ва, барит или отсутствует в рудах, или его количество низкое, а распространенным минералом он становится при содержании >50 г/т Ва.

В базальтах E-MORB поля Лаки Страйк содержания Ва варьируют от 44 до 316 г/т (среднее 144 г/т, медиана 62 г/т, расчет по данным (Langmuir et al., 1997, Table 1)) в отличие от базальтов N-MORB полей ТАГ и Брокен Спур, которые содержат 10–27 (Smith, Humphris, 1998) и 7.5 (Langmuir et al., 1997) г/т Ва. Содержания Ва в базальтах повышаются по мере приближения к Азорской горячей точке: от 40 г/т (среднее) в базальтах поля Рейнбоу к 70 г/т в базальтах поля Лаки Страйк, 120 г/т – поля Менез Гвен и 175 г/т – в районе 38°20' с.ш. САХ (Fouquet et al., 2010). Содержание Ва в базальтах непосредственно вблизи гидротермальных источников увеличивается в 1.5 и более раз: 61 г/т (среднее) в базальтах поля Рейнбоу, 283 г/т – поля Лаки Страйк, 232 г/т – поля Менез Гвен и 219 г/т – в районе 38°20' с.ш. САХ. Содержание Ва в обогащенных базальтах хребта Эксплорер, с которыми также связана сульфидная

минерализация с баритом (таблица), варьирует от 8 до 106 г/т (среднее – 47 г/т, медиана – 40 г/т, расчет по данным (Cousens et al., 1984, Table A1)).

Обогащение баритом полей в хребтах Северного Ледовитого океана (в частности, полей Тролльвеген и Сория Мория) обязано извлечению Ba из щелочных базальтов, которые образуются на более глубоких уровнях коры в результате меньшей степени плавления мантии, значительно обогащенной легкими РЗЭ и другими несовместимыми элементами в связи с чем базальты содержат повышенные концентрации несовместимых элементов (Neumann, Schilling, 1984). В случае поля Локис Касл, в районе которого базальты имеют характеристики N-MORB, за формирование баритовых труб ответственна ремобилизация барита из осадков в результате микробиальной сульфат-редукции (Eickmann et al., 2014).

В районе ВОК 13°30' с.ш. САХ, вмещающего гидротермальный сульфидный узел Семенов, состав стекол из базальтов лав варьирует от D-MORB (обедненные базальты) и N-MORB (нормальные базальты) до E-MORB (обогащенные базальты с содержанием K₂O до 0.9 мас. % и отношением La/Sm_N >1.5) (рис. 1, табл. 3) (Pertsev et al., 2021; Aranovich et al., 2023). Содержание Ba в этих породах варьирует от 10 до 229 г/т (среднее – 107 г/т, медиана – 88 г/т, расчет по данным (Pertsev et al., 2021, Supplementary Table 2), что позволяет рассматривать данные породы в качестве источника Ba.

Интрузивные мафические аналоги также содержат Ba. Габброиды с содержанием Ba (16–45 г/т) известны в районе 15°44' с.ш. САХ (Силантьев и др., 2008). В одном образце габбро, поднятом с юго-западного склона ВОК в районе узла Семенов, содержание Ba составляет 175 г/т (Aranovich et al., 2023, Table 1). С габброидными интрузиями также связывается присутствие баритовых труб на неактивном поле Рейнбоу-2 (Fouquet et al., 2010), а также обогащение Ba флюида поля Рейнбоу, в котором зафиксированы одни из самых высоких содержаний Ba (>67 микромоляр), сопоставимые с таковыми на поле Лаки Страйк (>80 микромоляр) (Douville et al., 2002). Однако в структурах ВОК с ГСП габброиды присутствуют всегда, но обогащение Ba сульфидных руд пока известно только в структурах ВОК (Семенов-1, -3, -4, Рейнбоу-2), именно там, где имеются находки базальтов E-MORB (табл. 1).

Влияние кислых пород. Сульфидные залежи в островодужных обстановках, связанных с кислым вулканизмом, всегда обогащены Ba по сравнению

с сульфидными залежами COX (Hannington et al., 1995). Обогащение Ba (а также Pb, As, Ag, Au, Sb и Cd) гидротермальной минерализации горы Джордан, сложенной щелочными базальтами в Юго-Западном Индийском хребте, связывается с вовлечением в гидротермальную систему кислых дифференциатов, подстилающих базальтовый покров (Nayak et al., 2014). Кислые интрузивные породы под общим термином «океанские плагиограниты» широко известны в срединных хребтах и, в частности, в районах ВОК, включая ВОК 13°30' с.ш. САХ (Перцев и др., 2012). Их химический состав из района ВОК 13°30' с.ш. САХ пока не известен, однако, к примеру, трондьемиты, интродуцирующие габброиды в районе 15°44' с.ш. САХ, содержат в два раза больше Ba (74.3 г/т), чем габброиды (Силантьев и др., 2008). В одном случае, 827 г/т Ba определено в кислой дайке, прорывающей габброиды скважины 735В, пробуренной на банке Атлантис в восточной части трансформного разлома Атлантис II в Юго-Западном Индийском хребте (Chen et al., 2019).

Для оценки возможного вклада кислых пород в данной работе проведено физико-химическое моделирование взаимодействия риодацита с морской водой и магматическим газом (электронное приложение). Результаты моделирования системы с риодацитом (рисунок, электронное приложение) оказались близки результатам моделирования системы с базальтом типа E-MORB (Melekestseva et al., 2014, Fig. 6), при этом количество барита, которое образуется в системе риодацит + морская вода аналогично таковому, которое образуется в системе базальт типа E-MORB + морская вода + магматический газ, что говорит о возможном извлечении из них Ba.

Оценка магматического вклада. Ранее в результате физико-химического моделирования было показано, что минеральная ассоциация, сходная с наблюдаемой в рудах поля Семенов-1, образуется при взаимодействии базальта, обогащенного Ba (200 г/т), с морской водой при добавлении магматического газа (Melekestseva et al., 2014). Вовлечение магматического газа, которое способствовало более интенсивному извлечению Ba из пород, подтверждается присутствием пиков SO₂ (1150 см⁻¹) и CO₂ (1370 и 1388 см⁻¹) в рамановских спектрах флюидных включений в барите поля Семенов-1 и отрицательными значениями изотопного состава S ассоциирующих сульфидов (до –3.26‰) (Melekestseva et al., 2014).

Таблица 3

Станции опробования с базальтами E-MORB в районе гидротермального узла Семенов

Table 3

Sampling stations with E-MORBs in area of the Semenov hydrothermal cluster

№ станции	Тип пробоотбора	Координаты		Содержание Ba и отношение La/Sm _N в базальтах (Pertsev et al., 2021)
		с.ш.	в.д.	
30Л284 ¹	Драга	13°30'801"	44°54'800"	Ba 174 г/т, La/Sm _N 1.96, № обр. 30L284-6 (№ 24 на Fig. 1)
		13°30'601"	44°55'195"	
30Л289 ¹		13°31'498"	44°56'498"	Ba 198 г/т, La/Sm _N 2.24, № обр. 30L289-1 (№ 19 на Fig. 1)
		13°31'012"	44°56'500"	
30Л295 ¹	ТВ грейфер	13°30'422"	44°56'339"	Ba 166 г/т, La/Sm _N 1.96, № обр. 30L295-2 (№ 25 на Fig. 1)
32Л239 ²	Драга	13°31'40"	44°58'12"	Ba 43.9 г/т, La/Sm _N 1.11, № обр. 32L239-1 (№ 20 на Fig. 1)
		13°30'48"	44°58'40"	
32Л242 ²		13°30'54"	44°56'60"	Ba 179 г/т, La/Sm _N 1.74, № обр. 32L242-1 (№ 23 на Fig. 1)
		13°30'36"	44°56'15"	
32Л241 ²		13°31'90"	44°56'14"	Ba 142 г/т, La/Sm _N 1.93, № обр. 32L241-1 (№ 22 на Fig. 1)
	13°30'51"	44°56'21"		

Примечание. ¹ – координаты даны по данным из отчета ПМГРЭ, 2011; ² – координаты преобразованы в онлайн конвертере (http://the-mostly.ru/konverter_geograficheskikh_koordinat.html) из десятичных значений, приведенных в Supplementary Table S1 (Pertsev et al., 2021).

Note. ¹ – coordinates are given after unpublished report of the Polar Marine Geosurvey Expedition, 2011; ² – coordinates are converted online (http://the-mostly.ru/konverter_geograficheskikh_koordinat.html) from decimal values given in Supplementary Table S1 (Pertsev et al., 2021).

Магматический вклад в рудообразование предполагается также для гидротермального поля Менез Гвен на основании изучения расплавных включений в плагиоклазе и оливине из вмещающих базальтов (Marques et al., 2011). Гидротермальные системы полей Менез Гвен и Лаки Страйк содержат высокие концентрации газов (CO₂, CH₄, He) (von Damm et al., 1998; Charlou et al., 2000), что также свидетельствует о магматической дегазации (de Ronde et al., 2011). Косвенно на магматический вклад могут также указывать отрицательные величины изотопного состава серы раннего пирита постройки Эйфелева башня поля Лаки Страйк до -2.4‰ (Богданов и др., 2006а). Сходными чертами (высокие содержания газов, отрицательные значения изотопного состава серы сульфидов) обладают ГСП с обильным баритом пролива Брансфилд (пролив Хука) (Petersen et al., 2004) и подводных вулканов Бразерс (дуга Тонга-Кермадек) (de Ronde et al., 2011) и Лойхи (Гавайские острова) (Davis et al., 2003).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обзора и сравнительного анализа гидротермальных полей срединно-океанических хребтов показано, что присутствие значимых ко-

личеств барита и высокие содержания Ba в рудах гидротермальных полей на внутриокеанических комплексах является индикатором связи рудообразования с базальтами E-MORB, за исключением случаев, когда обогащение баритом отражает ремобилизацию барита из осадков в результате микробальной сульфат-редукции. Для руд, обогащенных баритом, вне зависимости от геологической ситуации имеются аргументы о магматическом вкладе в минералообразование. Для полей узла Семенов, расположенном на внутриокеаническом комплексе 13°30' с.ш. САХ, о магматическом вкладе свидетельствуют отрицательный изотопный состав серы сульфидов, ассоциирующих с баритом, присутствие пиков магматических газов (CO₂ и SO₂) в рамановских спектрах флюидных включений в барите, а также результаты физико-химического моделирования, подтверждающие образование барит-сульфидной ассоциации при взаимодействии базальта E-MORB, морской воды и магматического газа. Результаты моделирования системы с кислыми породами показывают, что океанские плагиограниты из структур внутриокеанических комплексов, несмотря на их ограниченное распространение, также могут быть дополнительными поставщиками Ba в гидротермальную систему.

ЛИТЕРАТУРА

- Батуев Б.Н., Кротов А.Г., Марков В.Ф., Черкашев Г.А., Краснов С.Г., Лисицын Е.Д. (1995) Новое гидротермальное поле в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (14°45' с.ш.). Доклады Академии наук, 343 (1), 75–79.
- Бельтнев В.Б., Иванов В.Н., Сергеев М.Б., Рождественская И.И., Самоваров М.Л. (2012) Результаты поисковых работ на полиметаллические сульфиды в Атлантике в 2011 г. в свете подачи российской заявки в МОМД. Разведка и охрана недр, 8, 50–55.
- Бельтнев В.Е., Рождественская И.И., Самсонов И.К. (2016ф) 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.
- Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Викентьев И.В., Леин А.Ю., Гурвич Е.Г., Сагалевич А.М., Симонов В.А., Икорский С.В., Ставрова О.О., Аполлонов В.Н. (2002) Минералого-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд и флюида поля Рейнбоу, ассоциированного с серпентинитами, Срединно-Атлантический хребет (36°14' с.ш.). Геология рудных месторождений, 44 (6), 510–542.
- Богданов Ю.А., Леин А.Ю., Сагалевич А.М., Ульянов А.А., Дорофеев С.А., Ульянова Н.В. (2006а) Гидротермальные сульфидные отложения поля Лаки Страйк (Срединно-Атлантический хребет). Геохимия, 4, 445–461.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. (2006б) Гидротермальный рудогенез океанского дна. М., Наука, 527 с.
- Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Бельтнев В.Е., Люткевич А.Д., Наркевский Е.В., Густайтис А.Н. (2012) Особенности современного сульфидного оруденения в районе 19°15'–20°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта. Доклады Академии наук, 442 (4), 506–510.
- Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Лайба А.А., Наркевский Е.В., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. (2018) Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа (17°07'–17°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта). Литология и полезные ископаемые, 6, 475–500.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Артемьев Д.А., Юминов А.М., Симонов В.А., Дунаев А.Ю. (2009) Геология и колчеданное оруденение южного фланга Главного Уральского разлома. Миасс, Геотур, 376 с.
- Леин А.Ю., Богданов Ю.А., Масленников В.В., Ли С., Ульянова Н.В., Масленникова С.П., Ульянов А.А. (2010) Сульфидные минералы нерудного гидротермального поля Менез Гвен (Срединно-Атлантический хребет). Литология и полезные ископаемые, 4, 343–362.
- Леин А.Ю., Черкашев Г.А., Ульянов А.А., Ульянова Н.В., Степанова Т.В., Сагалевич А.М., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г., Торохов М.П. (2003) Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачев-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия. Геохимия, 3, 304–328.
- Маковиз А.М., Мусатов А.Е., Сергеева И.А., Черкашев Г.А., Наркевский Е.В., Шипов Р.В., Жидков З.В., Крюков Д.А., Добрецова И.Г., Скаковский В.Л., Каминский Д.В., Степанова М.С., Бич А.С., Савин А.С. (2023) Открытие новых гидротермальных рудных полей «Коралловое» (13°07' с.ш.) и «Молодежное» (13°09' с.ш.) в пределах Срединно-Атлантического хребта. Океанология, 63 (1), 124–134. <https://doi.org/10.31857/S0030157423010070>
- Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение (1988) Свердловск, УрО АН СССР, 241 с.
- Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Иванов В.Н., Бельтнев В.Е., Добрецова И.Г., Нимис П. (2010) Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет. Литосфера, 2, 47–61.
- Мелекесцева И.Ю., Бельтнев В.Б., Иванов В.Н. (2014) Петербургское гидротермальное поле, 19°52' с.ш., Срединно-Атлантический хребет: типы сульфидных руд и минерализованных пород. Металлогения древних и современных океанов-2014. Двадцать лет на передовых рубежах геологии месторождений полезных ископаемых. Миасс, ИМин УрО РАН, 72–76.
- Перцев А.Н., Бортников Н.С., Власов Е.А., Бельтнев В.Е., Добрецова И.Г., Агеева О.А. (2012) Современные колчеданные залежи рудного района Семенов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с.ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений. Геология рудных месторождений, 54 (5), 400–415.
- Силантьев С.А., Данюшевский Л.В., Плечова А.А., Доссо Л., Базылев Б.А., Бельтнев В.Е. (2008) Геохимические и изотопные черты продуктов магматизма рифтовой долины САХ в районах 12°49'–17°23' с.ш. и 29°59'–33°41' с.ш.: свидетельство двух контрастных источников родительских расплавов. Петрология, 16 (1), 73–100.
- Alt J.C. (1988) The chemistry and sulfur isotope composition of massive sulfide and associated deposits on Green Seamount, eastern Pacific. *Economic Geology*, 83 (5), 1026–1033. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.5.1026>
- Amplieva E.E., Bortnikov N.S., Koval'chuk E.V., Beltenev V.E. (2017) The Pobeda modern submarine hydrothermal sulfide edifice cluster (Mid-Atlantic Ridge, 17°08' N): mineralogy and chemical composition. *14th SGA Biennial Meeting “Mineral Resources to Discover”*, Quebec, 2, 649–652.
- Andreani M., Escartin J., Delacour A., Ildelfonse B., Godard M., Dymont J., Fallick A.E., Fouquet Y. Tectonic structure, lithology, and hydrothermal signature of the Rainbow massif (Mid-Atlantic Ridge 36°14' N). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3543–3571, doi:10.1002/2014GC005269.

- Aranovich L.Y., Pertsev A.N., Girmis A.V., Bortnikov N.S., Antoshechkina P.M. (2023) Basalts from MAR at 13°15'–13°40' N: What mixed? *Lithos*, 462–463 107424. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107424>
- Augustin N., Lackschewitz K.S., Kuhn T., Devey C.W. (2008) Mineralogical and chemical mass changes in mafic and ultramafic rocks from the Logatchev hydrothermal field (MAR 15° N). *Marine Geology*, 256, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.09.004>
- Barret T.J., Jarvis I., Jarvis K.E. (1990) Rare earth element geochemistry of massive sulfides-sulfates and gossans on the Southern Explorer Ridge. *Geology*, 18, 583–586. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0583:RE EGOM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0583:RE EGOM>2.3.CO;2)
- Barrie C.T., Hannington M.D. (1999) Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition. *Reviews in Economic Geology “Volcanic Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings”*, 8, 1–11. <https://doi.org/10.5382/Rev.08.01>
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Davydov M., Laiba A., Kaylio V., Narkevsky E., Pertsev A., Dobretzova I., Gustaytis A., Popova Ye., Amplieva Ye., Evrard C., Moskalev L., Gebruk A. (2009) New data about hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge between 11°–14° N: 32nd cruise of R/V Professor Logatchev. *InterRidge News*, 18, 14–18.
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Pertsev A., Davydov M., Egorov I., Melekestseva I., Narkevsky E., Ignatov V. (2007) A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge. *InterRidge News*, 16, 9–10.
- Beltenev V., Nescheretov A., Shilov V., Ivanov V., Shagin A., Stepanova T., Cherkashev G., Batuev B., Samovarov M., Rozhdestvenskaya I., Andreeva I., Fedorov I., Davydov M., Romanova L., Rumyantsev A., Zaharov V., Luneva N., Artem'eva O. (2003) New discoveries at 12°58' N and 44°52' W, MAR: initial results from the Professor Logatchev-22 cruise. *InterRidge News*, 12 (1), 13–14.
- Beaudoin Y. (2001) Physiology, geology and geochemistry of the Southern Explorer Ridge seafloor hydrothermal site using an integrated GIS database and 3D modeling. *Master's Thesis*. Toronto, University of Toronto, 102 p.
- Cao H., Sun Z., Zhai S., Cao Z., Jiang X., Huang W., Wang L., Zhang X., He Y. (2018) Hydrothermal processes in the Edmond deposits, slow- to intermediate-spreading Central Indian Ridge. *Journal of Marine Systems*, 180, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.016>
- Charlou J.L., Donval J.P., Douville E., Jean-Baptiste P., Radford-Knoery J., Fouquet Y., Dapigny A., Stievenard M. (2000) Compared geochemical signatures and the evolution of Menez Gwen 37°50' N and Lucky Strike 37°17' N hydrothermal fluids, south of the Azores Triple Junction on the Mid-Atlantic Ridge. *Chemical Geology*, 171, 49–75. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00244-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00244-8)
- Chen K., Zhang H., Cook N.J., Tao C., An F., Liang J., Yang W. (2024) Gold enrichment mechanism in mid-ocean ridge hydrothermal systems: an example from the Longqi hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge. *Economic Geology*, <https://doi.org/10.5382/econgeo.5095>
- Chen Y., Niu Y., Wang X., Gong H., Guo P., Gao Y., Shen F. (2019) Petrogenesis of ODP Hole 735B (Leg 176) oceanic plagiogranite: partial melting of gabbros or advanced extent of fractional crystallization? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 2717–2732. <https://doi.org/10.1029/2019GC008320>
- Cherkashov G., Bel'tenev V., Ivanov V., Lazareva L., Samovarov M., Shilov V., Stepanova T., Glasby G.P., Kuznetsov V. (2008) Two new hydrothermal fields at the Mid-Atlantic Ridge. *Marine Georesources and Geotechnology*, 26, 308–316. <https://doi.org/10.1080/10641190802400708>
- Choi S.K., Pak S.J., Kim J., Park J.-W., Son S.-K. (2021) Gold and tin mineralisation in the ultramafic-hosted Cheoem vent field, Central Indian Ridge. *Mineralium Deposita*, 56, 885–906. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01012-5>
- Choi S.K., Pak S.J., Kim J., Shin J.Y., Yang S., Jang H., Son S.-K. (2023) Mineralogy and trace element geochemistry of hydrothermal sulfides from the Ari vent field, Central Indian Ridge. *Mineralium Deposita*, 58, 1537–1558. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01191-x>
- Connelly D.P., Copley J.T., Murton B.J., Stansfield K., Tyler P.A., German C.R., Van Dover C.L., Amon D., Furlong M., Grindlay N., Hayman N., Hühnerbach V., Judge M., Le Bas T., McPhail S., Meier A., Nakamura K., Nye V., Pebody M., Pedersen R.B., Plouviez S., Sands C., Searle R.C., Stevenson P., Taws S., Wilcox S. (2012) Hydrothermal vent fields and chemosynthetic biota on the world's deepest seafloor spreading centre. *Nature Communications*, 3, 620. <https://doi.org/10.1038/ncomms1636>
- Cousen B.L., Chase R.L., Schilling J.-G. (1984) Basalt geochemistry of the Explorer Ridge area, northeast Pacific Ocean. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 157–170.
- Davis A.S., Clague D.A., Zierenberg R.A., Wheat C.G., Cousens B.L. (2003) Sulfide formation related to changes in the hydrothermal system on Loihi seamount, Hawai'i, following the seismic event in 1996. *The Canadian Mineralogist*, 41, 457–472. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.2.457>
- de Ronde C.E.J., Massoth G.J., Butterfield D.A., Christenson B.W., Ishibashi J., Ditchburn R.G., Hannington M.D., Brathwaite R.L., Lupton J.E., Kamenetsky V.S., Graham I.J., Zellmer G.F., Dziak R.P., Embley R.W., Dekov V.M., Munnik F., Lahr J., Evans L.J., Takai K. (2011) Submarine hydrothermal activity and gold-rich mineralization at Brothers Volcano, Kermadec Arc, New Zealand. *Mineralium Deposita*, 46, 541–584. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0345-8>

- Dias Á.S.C.M.A., Barriga F.J.A.S. (2006) Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted Saldanha hydrothermal field (36°34' N; 33°26' W) at MAR. *Marine Geology*, 225, 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.07.013>
- Ding T., Dias Á.A., Wang J., Tan T., Liang J., Wu B., Tao C. (2023) Serpentinization and its implications for ultramafic-hosted sulfide mineralization: A case study at the Tianzuo hydrothermal field, 63.5° E, Southwest Indian Ridge. *Marine Geology*, 455, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106969>
- Douville E., Charlou J.L., Oelkers E.H., Bienvenu P., Jove Colon C.F., Donval J.P., Fouquet Y., Prieur D., Appriou P. (2002) The Rainbow vent fluids (36°14' N, MAR): the influence of ultramafic rocks and phase separation on trace metal content in Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 184, 37–48. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00351-5)
- Duckworth R.C., Knott R., Fallick A.E., Ricard D., Murton B.J., Van Dover C. (1995) Mineralogy and sulphur isotope geochemistry of the Broken Spur sulphides, 29° N, Mid-Atlantic Ridge. *Hydrothermal Vents and Processes*. Geological Society London Special Publications, 87, 175–190.
- Eickmann B., Thorseth I.H., Peters M., Strauss H., Brocker M., Pedersen R.B. (2014) Barite in hydrothermal environments as a recorder of seafloor processes: a multiple-isotope study from the Loki's Castle vent field. *Geobiology*, 12, 308–321. <https://doi.org/10.1111/gbi.12086>
- Embley R.W., Jonasson I.R., Perfit M.R., Franklin J.M., Tivey M.A., Malahoff A., Smith M.F., Francis T.J.G. (1988) Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos Ridge; sulfide mounds, stockwork zone, and differentiated lavas. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 517–539.
- Escartín J., Smith D.K., Cann J., Schouten H., Langmuir C.H., Escrig S. (2008) Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455 (9), 790–795. <https://doi.org/10.1038/nature07333>
- Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashev G., Poroshina I. (2019) Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semyenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 9, #294. <https://doi.org/10.3390/min9050294>
- Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T., Sukhanova A., Poroshina I., Beltenev V. (2022) New data for the internal structure of ultramafic-hosted seafloor massive sulfides (SMS) deposits: case study of the Semenov-5 hydrothermal field (13°31' N, MAR). *Minerals*, 12, #1593. <https://doi.org/10.3390/min12121593>
- Fouquet Y., Barriga F., Charlou J.L., Elderfield H., German C.R., Ondréas H., Parson L., Radford-Knoery J., Relvas J., Ribeiro A., Schults A., Appriou R., Cambon P., Costa I., Donval J.P., Douville E., Landuré J.Y., Normand A., Pellé H., Poncevera E., Riches S., Santana H., Stephan M. (1998) FLORES diving cruise with the Nautilie near the Azores—First dives on the Rainbow field: hydrothermal seawater/mantle interaction. *InterRidge News*, 7 (1), 24–28.
- Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J., Charlou J.-L., Ondréas H., Barriga F.J.A.S., Cherkashov G., Semkova T., Poroshina I., Bohn M., Donvall J. P., Henry K., Murphy P., Rouxel O. (2010) Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposits. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. AGU Geophysical Monograph, 321–368. <https://doi.org/10.1029/2008GM000746>
- Fouquet Y., von Stackelberg U., Charlou J.L., Erzinger J., Herzig, P.M., Muehe R., Wiedicke M. (1993) Metallogenesis in back-arc environments; the Lau Basin example. *Economic Geology*, 88, 2154–2181. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2154>
- Früh-Green G.L., Orcutt B.N., Rouméjon S., Lilley M.D., Morono Y., Cotterill C., Green S., Escartin J., John B.E., McCaig A.M., Cannat M., Ménez B., Schwarzenbach E.M., Williams M.J., Morgan S., Lang S.Q., Schrenk M.O., Brazelton W.J., Akizawa N., Boschi C., Dunkel K.G., Quéméneur M., Whattam S.A., Mayhew L., Harris M., Bayrakci G., Behrmann J.-H., Herrero-Bervera E., Hesse K., Liu H.-Q., Ratnayake A.S., Twing K., Weis D., Zhao R., Bilenker L. (2018) Magmatism, serpentinization and life: Insights through drilling the Atlantis Massif (IODP Expedition 357). *Lithos*, 323, 137–155. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.012>
- Gamo T., Chiba H., Yamanaka T., Okudaira T., Hashimoto J., Tsuchida S., Ishibashi J.-I., Kataoka S., Tsunogai U., Okamura K., Sano Y., Shinjo R. (2001) Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 371–379. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00511-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00511-8)
- Gieskes J.M., Simoneit B.R.T., Brown T., Shaw T., Wang Y.-C., Magenheim A. (1988) Hydrothermal fluids and petroleum in surface sediments of Guaymas Basin, Gulf of California; a case study. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 589–602.
- Goodfellow W.D., Blaise B. (1988) Sulfide formation and hydrothermal alteration of hemipelagic sediment in Middle Valley, northern Juan De Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 675–696.
- Goodfellow W.D., Franklin J.M. (1993) Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge. *Economic Geology*, 88, 2037–2068. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2037>
- Halbach P., Blum N., Münch U., Plüger W., Garbe-Schönberg D., Zimme, M. (1998) Formation and decay of a modern massive sulphide deposit in the Indian Ocean. *Mineralium Deposita*, 33, 302–309. <https://doi.org/10.1007/s001260050149>

- Halbach P., Pracejus B., Marten A. (1993) Geology and mineralogy of massive sulphide ores from the Central Okinawa Trough, Japan. *Economic Geology*, 88, 2210–2225. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2210>
- Hannington M.D., Jonasson I.R., Herzig P.M., Petersen S. (1995) Physical and chemical processes of seafloor mineralization at mid-ocean ridges. *Seafloor Hydrothermal Processes*. Geophysical Monograph, 91, 115–157.
- Hannington M., Herzig P., Scott S., Thompson G., Rona P. (1991) Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges. *Marine Geology*, 101, 217–248. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(91\)90073-D](https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90073-D)
- Hannington M., Scott S. (1988) Mineralogy and geochemistry of a hydrothermal silica-sulfide-sulfate spire in the caldera of Axial Seamount, Juan De Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 603–625.
- Hein J.R., Koski R.A., Embley R.W., Reid J., Chang S.-W. (1999) Diffuse-flow hydrothermal field in an oceanic fracture zone setting, Northeast Pacific: deposit composition. *Exploration and Mining Geology*, 8 (3–4), 299–322.
- Hekinian R., Fevrier M., Avedik F., Cambon P., Charlou J.L., Needham H.D., Raillard J., Boulegue J., Merlivat L., Moinet A., Manganini S., Lange J. (1983) East Pacific Rise near 13° N: geology of new hydrothermal fields. *Science*, 219 (4590), 1321–1324. <https://doi.org/10.1126/science.219.4590.1321>
- Hodgkinson M.R.S., Webber A.P., Roberts S., Mills R.A., Connelly D.P., Murton B.J. (2015) Talc-dominated seafloor deposits reveal a new class of hydrothermal system. *Nature Communications*, 6, 10150. <https://doi.org/10.1038/ncomms10150>
- Horikoshi E. (1969) Volcanic activity related to the formation of the Kuroko-type deposits in the Kosaka district, Japan. *Mineralium Deposita*, 4, 321–345. <https://doi.org/10.1007/BF00207161>
- Jamieson J.W., Hannington M.D., Tivey M.K., Hansteen T., Williamson N.M.-B., Stewart M., Fietzke J., Butterfield D., Frische M., Allen L., Cousens B., Langer J. (2016) Precipitation and growth of barite within hydrothermal vent deposits from the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173, 64–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.021>
- Krasnov S.G., Poroshina I.M., Cherkashov G.A. (1995) Geological setting of high-temperature hydrothermal activity and massive sulphide formation on fast- and slow-spreading ridges. *Hydrothermal Vents and Processes*. Geological Society Special Publication no. 87, 17–32.
- Kristall B., Kelley D.S., Hannington M.D., Delaney J.R. (2006) Growth history of a diffusely venting sulfide structure from the Juan de Fuca Ridge: A petrological and geochemical study. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q07001. <https://doi.org/10.1029/2005GC001166>
- Koschinsky A., Billings A., Devey C., Dubilier N., Duester N., Edge D., Garbe-Schönberg D., German C., Giere O., Keir R., Lackschewitz K., Mai H.A., Marbler H., Mawick J., Melchert B., Mertens C., Peters M., Sander S., Schmale O., Schmidt W., Seifert R., Seiter C., Stöber U., Suck I., Walter M., Weber S., Yoerger D., Zarrouk M., Zielinski F. (2006) Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4° S–10° S) during cruise M68/1. *InterRidge News*, 15, 9–15
- Koski R.A., Jonasson I.R., Kadko D.C., Wong F.L. (1994) Compositions, growth mechanisms, and temporal relations of hydrothermal sulfide-sulfate-silica chimneys at the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 99 (B3), 4813–4832. <https://doi.org/10.1029/93JB02871>
- Koski R.A., Shanks W.C., Bohrsen W. A., Oscarson R.L. (1988) The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda Ridge; implications for depositional processes. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 655–673.
- Langmuir C., Humphris S., Fornari D., Van Dover C., Von Damm K., Tivey M.K., Colodner D., Charlou J.-L., Desonie D., Wilson C., Fouquet Y., Klinkhammer G., Bougault H. (1997) Hydrothermal vents near a mantle hot spot: the Lucky Strike vent field at 37° N on the Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 69–91. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00027-7)
- Lehrmann B., Stobbs I.J., Lusty P.A.J., Murton B.J. (2018) Insights into extinct seafloor massive sulfide mounds at the TAG, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 8, 302. <https://doi.org/10.3390/min8070302>
- Li B., Wang J., Li C., Wang S., Fan L., Ye J., Dang Y., Yan Q., Shi X. (2024) An oceanic core complex and its associated weathered hydrothermal deposit on a ridge-transform intersection zone at 23° S, Southern Mid-Atlantic Ridge. *Marine Geology*, 475, 107360. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107360>
- Liao S., Tao C., Dias A.A., Deng X., Hu S., Liang J., Yang W., Yang X. (2023) Evidence of a distal axis inactive high-temperature hydrothermal field on the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge: Insights from mineralogy and geochemistry studies. *Marine Geology*, 465, 107158. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107158>
- Liang J., Tao C., Wang X., Su C., Gao W., Zhou Y., Xu W., Liu X., Ding Z. (2023) Geological context and vents morphology in the ultramafic-hosted Tianxiu field, Carlsberg Ridge. *Acta Oceanologica Sinica*, 42 (9), 62–70. <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2157-y>
- Lim D., Kim J., Kim W., Kim J., Kim D., Zhang L., Kwack K., Xu Z. (2022) Characterization of geochemistry in hydrothermal sediments from the newly discovered Onnuri vent field in the middle region of the Central Indian Ridge. *Frontiers in Marine Sciences*, 9, 810949. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.810949>
- Ludwig K.A., Kelley D.S., Butterfield D.A., Nelson B.K., Früh-Green G. (2006) Formation and evolution of carbonate chimneys at the Lost City hydrothermal field. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 3625–3645. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.016>

- MacLeod C.J., Searle R.C., Murton B.J., Casey J.F., Mallows C., Unsworth S.C., Achenbach K.L., Harris M. (2009) Life cycle of oceanic core complexes. *Earth and Planetary Science Letters*, 287, 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.08.016>
- Marques A.F.A., Barriga F.J.A.S., Scott S.D. (2007) Sulfide mineralization in an ultramafic-rock hosted seafloor hydrothermal system: from serpentinization to the formation of Cu–Zn–(Co)-rich massive sulfides. *Marine Geology*, 245, 20–39. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.05.007>
- Marques A.F.A., Roerdink D.L., Baumberger T., de Ronde C.E.J., Ditchburn R.G., Denny A., Thorseth I.H., Okland I., Lilley M.D., Whitehouse M.J., Pedersen, R.B. (2020) The Seven Sisters hydrothermal system: first record of shallow hybrid mineralization hosted in mafic volcanoclasts on the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Minerals*, 10, 439. <https://doi.org/10.3390/min10050439>
- Marques A.F.A., Scott S.D., Guillong M. (2011) Magmatic degassing of ore-metals at the Menez Gwen: input from the Azores plume into an active Mid-Atlantic Ridge seafloor hydrothermal system. *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.07.021>
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R., Danyushevsky L., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluykov A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, 85, 64–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.012>
- Melchert B., Devey C.W., German C.R., Lackschewitz K.S., Seifert R., Walter M., Mertens C., Yoerger D.R., Baker E.T., Paulick H., Nakamura K. (2008) First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat: The Nibelungen hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.08.010>
- Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P., Yuminov A.M., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A., Beltenev V.E., Danyushevsky L.V., Large R. (2014) Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input. *Marine Geology*, 349, 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.013>
- Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A., Nimis P., Beltenev V.E., Rozhdestvenskaya I.I., Maslennikova S.P., Belogub E.V., Danyushevsky L., Large R., Yuminov A.M., Sadykov S.A. (2017) Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? *Economic Geology*, 112 (4), 741–773. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.4.741>
- Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N., Nimis P., Maslennikova S., Beltenev V., Rozhdestvenskaya I., Danyushevsky L., Large R., Artemyev D., Kotlyarov V., Toffolo L. (2018) Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern. *Minerals*, 8 (8), 321. <https://doi.org/10.3390/min8080321>
- Mozgova N.N., Trubkin N.V., Borodaev Yu.S., Cherkashov G.A., Stepanova T.V., Semkova T.A., Uspenskaya T.Yu. (2008) Mineralogy of massive sulfides from the Ashadze hydrothermal field, 13° N, **Mid-Atlantic Ridge**. *The Canadian Mineralogist*, 46, 545–567. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.3.545>
- Nayak B., Halbach P., Pracejus B., Münch U. (2014) Massive sulfides of Mount Jourdanne along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis. *Ore Geology Reviews*, 63, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.004>
- Neumann E.-R., Schilling J.-G. (1984) Petrology of basalts from the Mohns-Knipovich Ridge; the Norwegian-Greenland Sea. *Contribution to Mineral Petrology*, 85, 209–223. <https://doi.org/10.1007/BF00378101>
- Oudin E., Constantinou G. (1984) Black smoker chimney fragments in Cyprus sulfide deposits. *Nature*, 308, 349–353. <https://doi.org/10.1038/308349a0>
- Paradis S., Jonasson I.R., Le Cheminant G.M., Watkins D.H. (1988) Two zinc-rich chimneys from the plume site, southern Juan de Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 637–654.
- Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygård T.E., Lilley M.D., Kelley D.S. (2010) Hydrothermal activity at the Arctic Mid-Ocean ridges. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. AGU Geophysical Monograph, 67– 89. <https://doi.org/10.1029/2008GM000783>.
- Peter J.M., Scott S.D. (1988) Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of sea-floor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 567–587.
- Pertsev A.N., Aranovich L.Y., Prokofiev V.Y., Solovova I.P., Ageeva O.A., Borisovskiy S.E., Shatagin K.N., Zhilicheva O.M. (2021) Potassium-rich granite melt inclusions in zircon from gabbro-hosted felsic stringers, Mid-Atlantic Ridge at 13°34' N: E-MORB connection. *Lithos*, 400–401, 106300. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106300>
- Petersen S., Herzig P.M., Hannington M.D. (2000) Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, 26° N. *Mineralium Deposita*, 35, 233–259. <https://doi.org/10.1007/s001260050018>
- Petersen S., Herzig P.M., Schwarz-Schampera U., Hannington M.D., Jonasson I.R. (2004) Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica. *Mineralium Deposita*, 39, 358–379. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0414-3>
- Ramirez-Llodra E., Argentino C., Baker M., Boetius A., Costa C., Dahle H., Denny E.M., Dessandier P.-A.,

- Eilertsen M.H., Ferre B., German C.R., Hand K., Hilário A., Hislop L., Jamieson J.W., Kalnitchenko D., Mall A., Panieri G., Purser A., Ramalho S.P., Reeves E.P., Rolley L., Pereira S.I., Ribeiro P.A., Sert M.F., Steen I.H., Stetzler M., Stokke R., Victorero L., Vulcano F., Vegenes S., Waghorn K.A., Buenz S. (2023) Hot vents beneath an icy ocean: The Aurora vent field, Gakkel Ridge, Revealed. *Oceanography*, 36 (1), 6–17. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.103>.
- Rona P.A., Denlinger R.P., Fisk M.R., Howard K.J., Taghon G.L., Klitgord K.D., McClain J.S., McMurray G.R., Wiltshire J.C. (1990) Major off-axis hydrothermal activity on the northern Gorda Ridge. *Geology*, 18, 493–406. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0493:MOAHAO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0493:MOAHAO>2.3.CO;2)
- Sawyer G.M., Oppenheimer C., Tsanev V.I., Yirgu G. (2008) Magmatic degassing at Erta ‘Ale volcano, Ethiopia. *Journal of Volcanic and Geothermal Resources*, 178, 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.09.017>
- Smith S.E., Humphris S.E. (1998) Geochemistry of basaltic rocks from the TAG hydrothermal mound (26°08' N), Mid-Atlantic Ridge. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 158, 213–229.
- Snow J., Hellebrand E., Jokat W., Mühe B. (2001) Magmatic and hydrothermal activity in Lena Trough, Arctic Ocean. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 82 (17), 193–200. <https://doi.org/10.1029/01EO00101>
- Steele J.H., Thorpe S.A., Turekian K.K. (2010) *Marine chemistry and geochemistry: a derivative of encyclopedia of ocean sciences*. London, Elsevier. 2nd edition, 631 p.
- Tao C., Li H., Huang W., Han X., Wu G., Su X., Zhou N., Lin J., He Y., Zhou J. (2011) Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the 49°39' E hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge and their geological inferences. *Chinese Science Bulletin*, 56 (26), 828–2838. <https://doi:10.1007/s11434-011-4619-4>
- Tao C., Li H., Jin X., Zhou J., Wu T., He Y., Deng X., Gu C., Zhang G., Liu W. (2014) Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the southwest Indian ridge. *Chinese Science Bulletin*, 59(19), 2266–2276. <https://doi:10.1007/s11434-014-0182-0>
- Taylor J., Devey C., Le Saout M., Petersen S., Frutos I., Linse K., Lörz A.-N., Pałgan D., Tandberg A.H., Svavarsson J., Thorhallsson D., Tomkowicz A., Egilsdóttir H., Ragnarsson S.Á., Renz J., Markhaseva E.L., Gollner S., Paulus E., Kongsrud J., Beermann J., Kocot K.M., Meißner K., Bartholomä A., Hoffman L., Vannier P., Marteinson V., Rapp H.T., Diaz-Agras G., Tato R., Brix S. The discovery and preliminary geological and faunal descriptions of three new Steinahóll vent sites, Reykjanes Ridge, Iceland. *Frontiers in Marine Sciences*, 8, 520713. <https://doi:10.3389/fmars.2021.520713>
- Tivey M.K., Delaney J.R. (1986) Growth of large sulfide structures on the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 77, 303–317. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90142-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90142-1)
- von Damm K.L., Bray A.M., Buttermore L.G., Oosting S.E. (1998) The geochemical controls on vent fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 521–536. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00108-3)
- Wang Y., Han X., Petersen S., Jin X., Qiu Z., Zhu J. (2014) Mineralogy and geochemistry of hydrothermal precipitates from Kairei hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Marine Geology*, 354, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.05.003>
- Wang Y., Han X., Petersen S., Frische M., Qiu Z., Li H., Li H., Wu Z., Cui R. (2017) Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews*, 84, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.020>
- Yang W., Tao C., Liao S., Liang J., Li W., Ding T., Dias Á.A., Wang X., Wang L. (2023) Record of hydrothermal activity in the Yuhuang hydrothermal field and its implications for the Southwest Indian Ridge: evidence from sulfide chronology. *Acta Oceanologica Sinica*, 42 (11), 59–68. <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2287-2>
- Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.L., Bouse R.M. (1993) Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, 88, 2069–2098. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2069>
- Zierenberg R.A., Shanks W.C., III, Bischoff J.L. (1984) Massive sulfide deposits at 21° N, East Pacific Rise: Chemical composition, stable isotopes, and phase equilibria. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 922–929, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<922:MSDANE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<922:MSDANE>2.0.CO;2)

REFERENCES

- Alt J.C. (1988) The chemistry and sulfur isotope composition of massive sulfide and associated deposits on Green Seamount, eastern Pacific. *Economic Geology*, 83 (5), 1026–1033. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.5.1026>
- Amplieva E.E., Bortnikov N.S., Koval'chuk E.V., Beltenev V.E. (2017) The Pobeda modern submarine hydrothermal sulfide edifice cluster (Mid-Atlantic Ridge, 17°08' N): mineralogy and chemical composition. *14th SGA Biennial Meeting “Mineral Resources to Discover”*, Quebec, 2, 649–652.
- Andreani M., Escartin J., Delacour A., Ildefonse B., Godard M., Dymont J., Fallick A.E., Fouquet Y. Tectonic structure, lithology, and hydrothermal signature of the Rainbow massif (Mid-Atlantic Ridge 36°14' N). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3543–3571, [doi:10.1002/2014GC005269](https://doi.org/10.1002/2014GC005269).
- Aranovich L.Y., Pertsev A.N., Girnits A.V., Bortnikov N.S., Antoshechkina P.M. (2023) Basalts from MAR at 13°15'–13°40' N: What mixed? *Lithos*, 462–463 107424. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107424>

- Augustin N., Lackschewitz K.S., Kuhn T., Devey C.W. (2008) Mineralogical and chemical mass changes in mafic and ultramafic rocks from the Logatchev hydrothermal field (MAR 15° N). *Marine Geology*, 256, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.09.004>
- Barret T.J., Jarvis I., Jarvis K.E. (1990) Rare earth element geochemistry of massive sulfides-sulfates and gossans on the Southern Explorer Ridge. *Geology*, 18, 583–586. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0583:RE EGOM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0583:RE EGOM>2.3.CO;2)
- Barrie C.T., Hannington M.D. (1999) Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition. *Reviews in Economic Geology “Volcanic Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings”*, 8, 1–11. <https://doi.org/10.5382/Rev.08.01>
- Batuev B.N., Krotov A.G., Markov V.F., Cherkashev G.A., Krasnov S.G., Lisitsyn E.D. (1995) New hydrothermal field in axial zone of Mid-Atlantic Ridge (14°45' N). *Doklady Akademii nauk (Doklady Academy of Sciences)*, 343 (1), 75–79. (in Russian)
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Davydov M., Laiba A., Kaylio V., Narkevsky E., Pertsev A., Dobretzova I., Gustaytis A., Popova Ye., Amplieva Ye., Evrard C., Moskalev L., Gebruk A. (2009) New data about hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge between 11°–14° N: 32nd cruise of R/V Professor Logatchev. *InterRidge News*, 18, 14–18.
- Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I., Cherkashov G., Stepanova T., Shilov V., Pertsev A., Davydov M., Egorov I., Melekestseva I., Narkevsky E., Ignatov V. (2007) A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge. *InterRidge News*, 16, 9–10.
- Beltenev V.B., Ivanov V.N., Sergeev M.B., Rozhdestvenskaya I.I., Samovarov M.L. (2012) Results of prospecting works for base metal sulfides in the Atlantic Ocean in 2011 in the light of submitting the Russian application in ISA. *Razvedka i okhrana nedr (Exploration and Protection of Earth's Interiors)*, 8, 50–55. (in Russian)
- Beltenev V., Nescheretov A., Shilov V., Ivanov V., Shagin A., Stepanova T., Cherkashev G., Batuev B., Samovarov M., Rozhdestvenskaya I., Andreeva I., Fedorov I., Davydov M., Romanova L., Rumyantsev A., Zaharov V., Luneva N., Artem'eva O. (2003) New discoveries at 12°58' N and 44°52' W, MAR: initial results from the Professor Logatchev-22 cruise. *InterRidge News*, 12 (1), 13–14.
- Beltenev V.B., Rozhdestvenskaya I.I., Samsonov I.K. (2016) *Unpublished report of the 37th cruise of R/V Professor Logatchev on prospecting works at the area of the Russian Exploration Area in Atlantic Ocean with estimation of promising resources of massive sulfides in blocks 31–45*. Moscow, PMGRE. (in Russian)
- Beaudoin Y. (2001) Physiology, geology and geochemistry of the Southern Explorer Ridge seafloor hydrothermal site using an integrated GIS database and 3D modeling. *Master's Thesis*. Toronto, University of Toronto, 102 p.
- Bogdanov Yu.A., Bortnikov, N.S., Vikentiev I.V., Lein A.Yu., Gurvich E.G., Sagalevich A.M., Simonov V.A., Ikorsky S.V., Stavrova O.O., Apollionov V.N. (2002) Mineralogical-geochemical peculiarities of hydrothermal sulfide ores and fluid in the Rainbow field associated with serpentinites, Mid-Atlantic Ridge (36°14' N). *Geology of Ore Deposits*, 44 (6), 444–473.
- Bogdanov Yu.A., Lein A.Yu., Sagalevich A.M., Ul'yanov A.A., Dorofeev S.A., Ul'yanova N.V. Hydrothermal sulfide deposits of the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge (2006a) *Geochemistry International*, 44 (4), 403–418. <https://doi.org/10.1134/S0016702906040070>
- Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. (2006b) *Seafloor hydrothermal ore genesis*. Moscow, Nauka, 527 p. (in Russian)
- Cao H., Sun Z., Zhai S., Cao Z., Jiang X., Huang W., Wang L., Zhang X., He Y. (2018) Hydrothermal processes in the Edmond deposits, slow- to intermediate-spreading Central Indian Ridge. *Journal of Marine Systems*, 180, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.016>
- Charlou J.L., Donval J.P., Douville E., Jean-Baptiste P., Radford-Knoery J., Fouquet Y., Dapigny A., Stievenard M. (2000) Compared geochemical signatures and the evolution of Menez Gwen 37°50' N and Lucky Strike 37°17' N hydrothermal fluids, south of the Azores Triple Junction on the Mid-Atlantic Ridge. *Chemical Geology*, 171, 49–75. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00244-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00244-8)
- Chen K., Zhang H., Cook N.J., Tao C., An F., Liang J., Yang W. (2024) Gold enrichment mechanism in mid-ocean ridge hydrothermal systems: an example from the Longqi hydrothermal field on the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge. *Economic Geology*, <https://doi.org/10.5382/econgeo.5095>
- Chen Y., Niu Y., Wang X., Gong H., Guo P., Gao Y., Shen F. (2019) Petrogenesis of ODP Hole 735B (Leg 176) oceanic plagiogranite: partial melting of gabbros or advanced extent of fractional crystallization? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 2717–2732. <https://doi.org/10.1029/2019GC008320>
- Cherkashov G., Bel'tenev V., Ivanov V., Lazareva L., Samovarov M., Shilov V., Stepanova T., Glasby G.P., Kuznetsov V. (2008) Two new hydrothermal fields at the Mid-Atlantic Ridge. *Marine Georesources and Geotechnology*, 26, 308–316. <https://doi.org/10.1080/10641190802400708>
- Choi S.K., Pak S.J., Kim J., Park J.-W., Son S.-K. (2021) Gold and tin mineralisation in the ultramafic-hosted Cheoem vent field, Central Indian Ridge. *Mineralium Deposita*, 56, 885–906. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01012-5>
- Choi S.K., Pak S.J., Kim J., Shin J.Y., Yang S., Jang H., Son S.-K. (2023) Mineralogy and trace element geochemistry of hydrothermal sulfides from the Ari vent field, Central Indian Ridge. *Mineralium Deposita*, 58, 1537–1558. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01191-x>
- Connelly D.P., Copley J.T., Murton B.J., Stansfield K., Tyler P.A., German C.R., Van Dover C.L., Amon D.,

- Furlong M., Grindlay N., Hayman N., Hühnerbach V., Judge M., Le Bas T., McPhail S., Meier A., Nakamura K., Nye V., Pebody M., Pedersen R.B., Plouviez S., Sands C., Searle R.C., Stevenson P., Taws S., Wilcox S. (2012) Hydrothermal vent fields and chemosynthetic biota on the world's deepest seafloor spreading centre. *Nature Communications*, 3, 620. <https://doi.org/10.1038/ncomms1636>
- Cousen B.L., Chase R.L., Schilling J.-G. (1984) Basalt geochemistry of the Explorer Ridge area, northeast Pacific Ocean. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 157–170.
- Davis A.S., Clague D.A., Zierenberg R.A., Wheat C.G., Cousens B.L. (2003) Sulfide formation related to changes in the hydrothermal system on Loihi seamount, Hawai'i, following the seismic event in 1996. *The Canadian Mineralogist*, 41, 457–472. <https://doi.org/10.2113/jscanmin.41.2.457>
- de Ronde C.E.J., Massoth G.J., Butterfield D.A., Christenson B.W., Ishibashi J., Ditchburn R.G., Hannington M.D., Brathwaite R.L., Lupton J.E., Kamenetsky V.S., Graham I.J., Zellmer G.F., Dziak R.P., Embley R.W., Dekov V.M., Munnik F., Lahr J., Evans L.J., Takai K. (2011) Submarine hydrothermal activity and gold-rich mineralization at Brothers Volcano, Kermadec Arc, New Zealand. *Mineralium Deposita*, 46, 541–584. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0345-8>
- Dias Á.S.C.M.A., Barriga F.J.A.S. (2006) Mineralogy and geochemistry of hydrothermal sediments from the serpentinite-hosted Saldanha hydrothermal field (36°34' N; 33°26' W) at MAR. *Marine Geology*, 225, 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.07.013>
- Ding T., Dias Á.A., Wang J., Tan T., Liang J., Wu B., Tao C. (2023) Serpentinization and its implications for ultramafic-hosted sulfide mineralization: A case study at the Tianzuo hydrothermal field, 63.5° E, Southwest Indian Ridge. *Marine Geology*, 455, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106969>
- Douville E., Charlou J.L., Oelkers E.H., Bienvu P., Jove Colon C.F., Donval J.P., Fouquet Y., Prieur D., Appriou P. (2002) The Rainbow vent fluids (36°14' N, MAR): the influence of ultramafic rocks and phase separation on trace metal content in Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 184, 37–48. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00351-5)
- Duckworth R.C., Knott R., Fallick A.E., Ricard D., Murton B.J., Van Dover C. (1995) Mineralogy and sulphur isotope geochemistry of the Broken Spur sulphides, 29° N, Mid-Atlantic Ridge. *Hydrothermal Vents and Processes*. Geological Society London Special Publications, 87, 175–190.
- Eickmann B., Thorseth I.H., Peters M., Strauss H., Brocker M., Pedersen R.B. (2014) Barite in hydrothermal environments as a recorder of subseafloor processes: a multiple-isotope study from the Loki's Castle vent field. *Geobiology*, 12, 308–321. <https://doi.org/10.1111/gbi.12086>
- Embley R.W., Jonasson I.R., Perfit M.R., Franklin J.M., Tivey M.A., Malahoff A., Smith M.F., Francis T.J.G. (1988) Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos Ridge; sulfide mounds, stockwork zone, and differentiated lavas. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 517–539.
- Escartín J., Smith D.K., Cann J., Schouten H., Langmuir C.H., Escrig S. (2008) Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455 (9), 790–795. <https://doi.org/10.1038/nature07333>
- Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashev G., Poroshina I. (2019) Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semyenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 9, #294. <https://doi.org/10.3390/min9050294>
- Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T., Sukhanova A., Poroshina I., Beltenev V. (2022) New data for the internal structure of ultramafic-hosted seafloor massive sulfides (SMS) deposits: case study of the Semenov-5 hydrothermal field (13°31' N, MAR). *Minerals*, 12, #1593. <https://doi.org/10.3390/min12121593>
- Fouquet Y., Barriga F., Charlou J.L., Elderfield H., German C.R., Ondreas H., Parson L., Radford-Knoery J., Relvas J., Ribeiro A., Schults A., Appriou R., Cambon P., Costa I., Donval J.P., Douville E., Landuré J.Y., Normand A., Pellé H., Poncevera E., Riches S., Santana H., Stephan M. (1998) FLORES diving cruise with the Nautilie near the Azores—First dives on the Rainbow field: hydrothermal seawater/mantle interaction. *InterRidge News*, 7 (1), 24–28.
- Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J., Charlou J.-L., Ondreas H., Barriga F.J.A.S., Cherkashov G., Semkova T., Poroshina I., Bohn M., Donval J. P., Henry K., Murphy P., Rouxel O. (2010) Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposits. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. AGU Geophysical Monograph, 321–368. <https://doi.org/10.1029/2008GM000746>
- Fouquet Y., von Stackelberg U., Charlou J.L., Erzinger J., Herzig, P.M., Muehe R., Wiedicke M. (1993) Metallogenesis in back-arc environments; the Lau Basin example. *Economic Geology*, 88, 2154–2181. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2154>
- Früh-Green G.L., Orcutt B.N., Rouméjon S., Lilley M.D., Morono Y., Cotterill C., Green S., Escartín J., John B.E., McCaig A.M., Cannat M., Ménez B., Schwarzenbach E.M., Williams M.J., Morgan S., Lang S.Q., Schrenk M.O., Brazelton W.J., Akizawa N., Boschi C., Dunkel K.G., Quéméneur M., Whattam S.A., Mayhew L., Harris M., Bayraktci G., Behrmann J.-H., Herrero-Bervera E., Hesse K., Liu H.-Q., Ratnayake A.S., Twing K., Weis D., Zhao R., Bilinker L. (2018) Magmatism, serpentinization and life: Insights through drilling the Atlantis Massif (IODP Expedition 357). *Lithos*, 323, 137–155. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.012>

- Gablina I.F., Dobretsova I.G., Beltenev V.E., Lyutkevich A.D., Narkevskii E.V., Gustaitis A.N. (2012) Peculiarities of present-day sulfide mineralization at 19°15'–20°08' N, Mid-Atlantic Ridge. *Doklady Earth Sciences*, 442, (2), 163–167. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1202002X>
- Gablina I.F., Dobretsova I.G., Laiba A.A., Narkevskii E.V., Maksimov F.E., Kuznetsov V.Yu. (2018) Specific features of sulfide ores in the Pobeda hydrothermal cluster, Mid-Atlantic Rise 17°07'–17°08' N. *Lithology and Mineral Resources*, 53 (6), 431–454. <https://doi.org/10.1134/S0024490218060020>
- Gamo T., Chiba H., Yamanaka T., Okudaira T., Hashimoto J., Tsuchida S., Ishibashi J.-I., Kataoka S., Tsunogai U., Okamura K., Sano Y., Shinjo R. (2001) Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 371–379. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00511-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00511-8)
- Gieskes J.M., Simoneit B.R.T., Brown T., Shaw T., Wang Y.-C., Magenheimer A. (1988) Hydrothermal fluids and petroleum in surface sediments of Guaymas Basin, Gulf of California; a case study. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 589–602.
- Goodfellow W.D., Blaise B. (1988) Sulfide formation and hydrothermal alteration of hemipelagic sediment in Middle Valley, northern Juan De Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 675–696.
- Goodfellow W.D., Franklin J.M. (1993) Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge. *Economic Geology*, 88, 2037–2068. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2037>
- Halbach P., Blum N., Münch U., Plüger W., Garbe-Schönberg D., Zimme, M. (1998) Formation and decay of a modern massive sulphide deposit in the Indian Ocean. *Mineralium Deposita*, 33, 302–309. <https://doi.org/10.1007/s001260050149>
- Halbach P., Pracejus B., Marten A. (1993) Geology and mineralogy of massive sulphide ores from the Central Okinawa Trough, Japan. *Economic Geology*, 88, 2210–2225. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2210>
- Hannington M., Herzig P., Scott S., Thompson G., Rona P. (1991) Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges. *Marine Geology*, 101, 217–248. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(91\)90073-D](https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90073-D)
- Hannington M., Scott S. (1988) Mineralogy and geochemistry of a hydrothermal silica-sulfide-sulfate spire in the caldera of Axial Seamount, Juan De Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 603–625.
- Hannington M.D., Jonasson I.R., Herzig P.M., Petersen S. (1995) Physical and chemical processes of seafloor mineralization at mid-ocean ridges. *Seafloor Hydrothermal Processes*. Geophysical Monograph, 91, 115–157.
- Hein J.R., Koski R.A., Embley R.W., Reid J., Chang S.-W. (1999) Diffuse-flow hydrothermal field in an oceanic fracture zone setting, Northeast Pacific: deposit composition. *Exploration and Mining Geology*, 8 (3–4), 299–322.
- Hekinian R., Fevrier M., Avedik F., Cambon P., Charlou J.L., Needham H.D., Raillard J., Boulegue J., Merlivat L., Moinet A., Manganini S., Lange J. (1983) East Pacific Rise near 13° N: geology of new hydrothermal fields. *Science*, 219 (4590), 1321–1324. <https://doi.org/10.1126/science.219.4590.1321>
- Hodgkinson M.R.S., Webber A.P., Roberts S., Mills R.A., Connelly D.P., Murton B.J. (2015) Talc-dominated seafloor deposits reveal a new class of hydrothermal system. *Nature Communications*, 6, 10150. <https://doi.org/10.1038/ncomms10150>
- Horikoshi E. (1969) Volcanic activity related to the formation of the Kuroko-type deposits in the Kosaka district, Japan. *Mineralium Deposita*, 4, 321–345. <https://doi.org/10.1007/BF00207161>
- Jamieson J.W., Hannington M.D., Tivey M.K., Hansteen T., Williamson N.M.-B., Stewart M., Fietzke J., Butterfield D., Frische M., Allen L., Cousens B., Langer J. (2016) Precipitation and growth of barite within hydrothermal vent deposits from the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173, 64–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.021>
- Krasnov S.G., Poroshina I.M., Cherkashov G.A. (1995) Geological setting of high-temperature hydrothermal activity and massive sulphide formation on fast- and slow-spreading ridges. *Hydrothermal Vents and Processes*. Geological Society Special Publication no. 87, 17–32.
- Kristall B., Kelley D.S., Hannington M.D., Delaney J.R. (2006) Growth history of a diffusely venting sulfide structure from the Juan de Fuca Ridge: A petrological and geochemical study. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q07001, <https://doi:10.1029/2005GC001166>.
- Koschinsky A., Billings A., Devey C., Dubilier N., Duester N., Edge D., Garbe-Schönberg D., German C., Giere O., Keir R., Lackschewitz K., Mai H.A., Marbler H., Mawick J., Melchert B., Mertens C., Peters M., Sander S., Schmale O., Schmidt W., Seifert R., Seiter C., Stöber U., Suck I., Walter M., Weber S., Yoerger D., Zarrouk M., Zielinski F. (2006) Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4° S–10° S) during cruise M68/1. *InterRidge News*, 15, 9–15
- Koski R.A., Jonasson I.R., Kadko D.C., Wong F.L. (1994) Compositions, growth mechanisms, and temporal relations of hydrothermal sulfide-sulfate-silica chimneys at the northern Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 99 (B3), 4813–4832. <https://doi.org/10.1029/93JB02871>
- Koski R.A., Shanks W.C., Bohrsen W. A., Oscarson R.L. (1988) The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda Ridge; implications for depositional processes. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 655–673.

- Langmuir C., Humphris S., Fornari D., Van Dover C., Von Damm K., Tivey M.K., Colodner D., Charlou J.-L., Desonie D., Wilson C., Fouquet Y., Klinkhammer G., Bougault H. (1997) Hydrothermal vents near a mantle hot spot: the Lucky Strike vent field at 37° N on the Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 69–91. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00027-7)
- Lehrmann B., Stobbs I.J., Lusty P.A.J., Murton B.J. (2018) Insights into extinct seafloor massive sulfide mounds at the TAG, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 8, 302. <https://doi.org/10.3390/min8070302>
- Lein A.Yu., Bogdanov Yu.A., Maslennikov V.V., Li S., Ulyanova, N.V. Maslennikova S.P., Ulyanov A.A. (2010) Sulfide minerals in the Menez Gwen nonmetallic hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge). *Lithology and Mineral Resources*, 45 (4), 305–323. <https://doi.org/10.1134/S0024490210040012>
- Lein A.Yu., Cherkashov G.A., Ul'yanov A.A., Ul'yanova N.V., Stepanova T.V., Sagalevich A.M., Bogdanov Yu.A., Gurvich E.G., Torokhov M.P. (2003) Mineralogy and geochemistry of sulfide ores from the Logachev-2 and Rainbow fields: Similar and distinctive features. *Geochemistry International*, 41, 271–294.
- Li B., Wang J., Li C., Wang S., Fan L., Ye J., Dang Y., Yan Q., Shi X. (2024) An oceanic core complex and its associated weathered hydrothermal deposit on a ridge-transform intersection zone at 23° S, Southern Mid-Atlantic Ridge. *Marine Geology*, 475, 107360. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107360>
- Liao S., Tao C., Dias A.A., Deng X., Hu S., Liang J., Yang W., Yang X. (2023) Evidence of a distal axis inactive high-temperature hydrothermal field on the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge: Insights from mineralogy and geochemistry studies. *Marine Geology*, 465, 107158. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107158>
- Liang J., Tao C., Wang X., Su C., Gao W., Zhou Y., Xu W., Liu X., Ding Z. (2023) Geological context and vents morphology in the ultramafic-hosted Tianxiu field, Carlsberg Ridge. *Acta Oceanologica Sinica*, 42 (9), 62–70. <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2157-y>
- Lim D., Kim J., Kim W., Kim J., Kim D., Zhang L., Kwack K., Xu Z. (2022) Characterization of geochemistry in hydrothermal sediments from the newly discovered Onnuri vent field in the middle region of the Central Indian Ridge. *Frontiers in Marine Sciences*, 9, 810949. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.810949>
- Ludwig K.A., Kelley D.S., Butterfield D.A., Nelson B.K., Früh-Green G. (2006) Formation and evolution of carbonate chimneys at the Lost City hydrothermal field. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 3625–3645. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.016>
- MacLeod C.J., Searle R.C., Murton B.J., Casey J.F., Mallows C., Unsworth S.C., Achenbach K.L., Harris M. (2009) Life cycle of oceanic core complexes. *Earth and Planetary Science Letters*, 287, 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.08.016>
- Makoviz A.M., Musatov A.E., Sergeeva I.A., Cherkashev G.A., Narkevsky E.V., Shipov R.V., Zhidkov Z.V., Kryukov D.A., Dobretsova I.G., Skakovsky V.L., Kaminsky D.V., Stepanova M.S., Bich A.S., Savin A.S. (2023) Discovery of New Hydrothermal Korallovo (13°07' N) and Molodezhnoe Ore Fields (13°09' N) in the Mid-Atlantic Ridge. *Oceanology*, 2023, Vol. 63, No. 1, pp. 109–118. <https://doi.org/10.1134/S0001437023010071>
- Steele J.H., Thorpe S.A., Turekian K.K. (2010) *Marine chemistry and geochemistry: a derivative of encyclopedia of ocean sciences*. London, Elsevier. 2nd edition, 631 p.
- Marques A.F.A., Barriga F.J.A.S., Scott S.D. (2007) Sulfide mineralization in an ultramafic-rock hosted seafloor hydrothermal system: from serpentinization to the formation of Cu–Zn–(Co)-rich massive sulfides. *Marine Geology*, 245, 20–39. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.05.007>
- Marques A.F.A., Roerdink D.L., Baumberger T., de Ronde C.E.J., Ditchburn R.G., Denny A., Thorseth I.H., Okland I., Lilley M.D., Whitehouse M.J., Pedersen, R.B. (2020) The Seven Sisters hydrothermal system: first record of shallow hybrid mineralization hosted in mafic volcanoclasts on the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Minerals*, 10, 439. <https://doi.org/10.3390/min10050439>
- Marques A.F.A., Scott S.D., Guillong M. (2011) Magmatic degassing of ore-metals at the Menez Gwen: Input from the Azores plume into an active Mid-Atlantic Ridge seafloor hydrothermal system. *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.07.021>
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R., Danyushevsky L., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluykov A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, 85, 64–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.012>
- Massive sulfide deposits of the Urals. Geological structure* (1988) Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 241 p. (in Russian)
- Melchert B., Devey C.W., German C.R., Lackschewitz K.S., Seifert R., Walter M., Mertens C., Yoerger D.R., Baker E.T., Paulick H., Nakamura K. (2008) First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat: The Nibelungen hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.08.010>
- Melekestseva I.Yu., Kotlyarov V.A., Ivanov V.N., Beltenev V.E., Dobretsova I.G., Nimis P. (2010) Ores of new Semenov hydrothermal sulfide cluster (13°31' N), Mid-Atlantic Ridge. *Litosfera (Lithosphere)*, 2, 47–61. (in Russian)
- Melekestseva I.Yu., Beltenev V.E., Ivanov V.N. Peterburgskoe hydrothermal field, 19°52' N, Mid-Atlantic Ridge: types of sulfide ores and mineralized rocks. *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans–2014. Twenty*

- Years at *Frontiers of Geology of Mineral Deposits*. Miass, IMin UrO RAN, 72–76. (in Russian)
- Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P., Yuminov A.M., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A., Beltenev V.E., Danyushevsky L.V., Large R. (2014) Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input. *Marine Geology*, 349, 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.013>
- Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A., Nimis P., Beltenev V.E., Rozhdestvenskaya I.I., Maslennikova S.P., Belogub E.V., Danyushevsky L., Large R., Yuminov A.M., Sadykov S.A. (2017) Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? *Economic Geology*, 112 (4), 741–773. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.4.741>
- Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N., Nimis P., Maslennikova S., Beltenev V., Rozhdestvenskaya I., Danyushevsky L., Large R., Artemyev D., Kotlyarov V., Toffolo L. (2018) Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern. *Minerals*, 8(8), 321. <https://doi.org/10.3390/min8080321>
- Mozgova N.N., Trubkin N.V., Borodaev Yu.S., Cherkashov G.A., Stepanova T.V., Semkova T.A., Uspenskaya T.Yu. (2008) Mineralogy of massive sulfides from the Ashadze hydrothermal field, 13° N, Mid-Atlantic Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 46, 545–567. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.3.545>
- Nayak B., Halbach P., Pracejus B., Münch U. (2014) Massive sulfides of Mount Jourdan along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis. *Ore Geology Reviews*, 63, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.004>
- Neumann E.-R., Schilling J.-G. (1984) Petrology of basalts from the Mohns-Knipovich Ridge, the Norwegian-Greenland Sea. *Contribution to Mineral Petrology*, 85, 209–223. <https://doi.org/10.1007/BF00378101>
- Oudin E., Constantinou G. (1984) Black smoker chimney fragments in Cyprus sulfide deposits. *Nature*, 308, 349–353. <https://doi.org/10.1038/308349a0>
- Paradis S., Jonasson I.R., Le Cheminant G.M., Watkinsons D.H. (1988) Two zinc-rich chimneys from the plume site, southern Juan de Fuca Ridge. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 637–654.
- Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygård T.E., Lilley M.D., Kelley D.S. (2010) Hydrothermal activity at the Arctic Mid-Ocean ridges. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. AGU Geophysical Monograph, 67–89. <https://doi.org/10.29/2008GM000783>
- Peter J.M., Scott S.D. (1988) Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of sea-floor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *The Canadian Mineralogist*, 26 (3), 567–587.
- Pertsev A.N., Aranovich L.Y., Prokofiev V.Y., Solovova I.P., Ageeva O.A., Borisovskiy S.E., Shatagin K.N., Zhilicheva O.M. (2021) Potassium-rich granite melt inclusions in zircon from gabbro-hosted felsic stringers, Mid-Atlantic Ridge at 13°34' N: E-MORB connection. *Lithos*, 400–401, 106300. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106300>
- Pertsev A.N., Bortnikov N.S., Vlasov E.A., Beltenev V.E., Dobretsova I.G., Ageeva O.A. (2012) Recent massive sulfide deposits of the Semenov ore district, Mid-Atlantic Ridge, 13°31' N: Associated rocks of the oceanic core complex and their hydrothermal alteration. *Geology of Ore Deposits*, 54, 334–346. <https://doi.org/10.1134/S1075701512050030>
- Petersen S., Herzig P.M., Hannington M.D. (2000) Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, 26° N. *Mineralium Deposita*, 35, 233–259. <https://doi.org/10.1007/s001260050018>
- Petersen S., Herzig P.M., Schwarz-Schampera U., Hannington M.D., Jonasson I.R. (2004) Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica. *Mineralium Deposita*, 39, 358–379. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0414-3>
- Ramirez-Llodra E., Argentino C., Baker M., Boetius A., Costa C., Dahle H., Denny E.M., Dessandier P.-A., Eilertsen M.H., Ferre B., German C.R., Hand K., Hilário A., Hislop L., Jamieson J.W., Kalnitchenko D., Mall A., Panieri G., Purser A., Ramalho S.P., Reeves E.P., Rolley L., Pereira S.I., Ribeiro P.A., Sert M.F., Steen I.H., Stetzler M., Stokke R., Victorero L., Vulcano F., Vegenes S., Waghorn K.A., Buentz S. (2023) Hot vents beneath an icy ocean: The Aurora vent field, Gakkel Ridge, Revealed. *Oceanography*, 36 (1), 6–17. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.103>
- Rona P.A., Denlinger R.P., Fisk M.R., Howard K.J., Taghon G.L., Klitgord K.D., McClain J.S., McMurray G.R., Wiltshire J.C. (1990) Major off-axis hydrothermal activity on the northern Gorda Ridge. *Geology*, 18, 493–406. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0493:MOAHAO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0493:MOAHAO>2.3.CO;2)
- Sawyer G.M., Oppenheimer C., Tsanev V.I., Yirgu G. (2008) Magmatic degassing at Erta 'Ale volcano, Ethiopia. *Journal of Volcanic and Geothermal Resources*, 178, 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.09.017>
- Silant'ev S.A., Danyushevsky L.V., Plechova A.A., Dosso L., Bazylev B.A., Bel'tenev V.E. (2008) Geochemical and isotopic signatures of magmatic products in the MAR rift valley at 12°49'–17°23' N and 29°59'–33°41' N: Evidence of two contrasting sources of the parental melts. *Petrology*, 16 (1), 36–62. <https://doi.org/10.1134/S0869591108010037>
- Smith S.E., Humphris S.E. (1998) Geochemistry of basaltic rocks from the TAG hydrothermal mound (26°08' N), Mid-Atlantic Ridge. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 158, 213–229.

- Snow J., Hellebrand E., Jokat W., Mühe B. (2001) Magmatic and hydrothermal activity in Lena Trough, Arctic Ocean. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 82 (17), 193–200. <https://doi.org/10.1029/01EO00101>
- Tao C., Li H., Huang W., Han X., Wu G., Su X., Zhou N., Lin J., He Y., Zhou J. (2011) Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the 49°39' E hydrothermal field on the Southwest Indian Ridge and their geological inferences. *Chinese Science Bulletin*, 56 (26), 828–2838. <https://doi:10.1007/s11434-011-4619-4>
- Tao C., Li H., Jin X., Zhou J., Wu T., He Y., Deng X., Gu C., Zhang G., Liu W. (2014) Seafloor hydrothermal activity and polymetallic sulfide exploration on the southwest Indian ridge. *Chinese Science Bulletin*, 59(19), 2266–2276. <https://doi:10.1007/s11434-014-0182-0>
- Taylor J., Devey C., Le Saout M., Petersen S., Frutos I., Linse K., Lörz A.-N., Pałgan D., Tandberg A.H., Svavarsson J., Thorhallsson D., Tomkowicz A., Egilsdóttir H., Ragnarsson S.Á., Renz J., Markhaseva E.L., Gollner S., Paulus E., Kongsrud J., Beermann J., Kocot K.M., Meißner K., Bartholomä A., Hoffman L., Vannier P., Marteinson V., Rapp H.T., Diaz-Agras G., Tato R., Brix S. The discovery and preliminary geological and faunal descriptions of three new Steinahóll vent sites, Reykjanes Ridge, Iceland. *Frontiers in Marine Sciences*, 8, 520713. <https://doi:10.3389/fmars.2021.520713>
- Tivey M.K., Delaney J.R. (1986) Growth of large sulfide structures on the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 77, 303–317. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90142-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90142-1)
- von Damm K.L., Bray A.M., Buttermore L.G., Oosting S.E. (1998) The geochemical controls on vent fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 521–536. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00108-3)
- Wang Y., Han X., Petersen S., Jin X., Qiu Z., Zhu J. (2014) Mineralogy and geochemistry of hydrothermal precipitates from Kairei hydrothermal field, Central Indian Ridge. *Marine Geology*, 354, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.05.003>
- Wang Y., Han X., Petersen S., Frische M., Qiu Z., Li H., Li H., Wu Z., Cui R. (2017) Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews*, 84, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.020>
- Yang W., Tao C., Liao S., Liang J., Li W., Ding T., Dias Á.A., Wang X., Wang L. (2023) Record of hydrothermal activity in the Yuhuang hydrothermal field and its implications for the Southwest Indian Ridge: evidence from sulfide chronology. *Acta Oceanologica Sinica*, 42 (11), 59–68. <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2287-2>
- Zaikov V.V., Melekestseva I.Yu., Artemyev D.A., Yuminov A.M., Simonov V.A., Dunaev A.Yu. (2009) *Geology and massive sulfide mineralization of the southern flank of the Main Urals Fault*. Miass, Geotur, 376 p. (in Russian)
- Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.L., Bouse R.M. (1993) Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, 88, 2069–2098. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2069>
- Zierenberg R.A., Shanks W.C., III, Bischoff J.L. (1984) Massive sulfide deposits at 21° N, East Pacific Rise: Chemical composition, stable isotopes, and phase equilibria. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 922–929, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<922:MSDANE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<922:MSDANE>2.0.CO;2)

Информация об авторах

- Мелекестсева Ирина Юрьевна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН; melekestseva-irina@yandex.ru
- Третьяков Геннадий Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН; genatret@yandex.ru
- Бельтнев Виктор Ефимович – ведущий геолог, ФГБУ ВНИИОкеангеология; v.belt@yandex.ru

Information about the authors

- Irina Yu. Melekestseva – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; melekestseva-irina@yandex.ru
- Gennady A. Tret'yakov – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Senior Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; genatret@yandex.ru
- Viktor E. Beltnev – Leading Geologist; Federal State Budgetary Enterprise VNIIOkeangeologia; v.belt@yandex.ru