

УДК 553.2.065(261.1)

МОРФОЛОГИЯ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2021 г. Г. А. Черкашёв^{1, 2, *}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. акад. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Государственный университет, Институт Наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: gcherkashov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.07.2020 г.

После доработки 08.08.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

Разнообразные данные, получаемые в процессе научных и геологоразведочных работ по изучению глубоководных сульфидных руд, включают в себя значительный материал по морфологии и внутреннему строению рудных тел, формирующихся в различных геологических обстановках. На примере рудных полей в северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта приводится описание различных типов гидротермальных рудных построек – от наиболее распространенных холмообразных до редко встречающихся кратеров. Проводится анализ причин, определяющих форму рудных тел, включая характер вмещающих пород, и процессов развития гидротермальных рудообразующих систем. В отличие от описания форм рудных тел с поверхности материалов по их внутреннему строению накоплено значительно меньше, в связи с чем имеющиеся объемные модели в основном носят гипотетический характер. В особенности это касается предположений о наличии массивного оруденения и механизма его формирования ниже поверхности палеодна. Очевидно, что результаты буровых работ, намеченные на ближайшее будущее, позволят подтвердить или опровергнуть имеющиеся модели и изменить оценку ресурсов, основанную в настоящее время преимущественно на поверхностном опробовании рудных тел.

Ключевые слова: Срединно-океанические хребты, гидротермальное рудообразование, морфология рудных тел, внутреннее строение сульфидных рудных тел

DOI: 10.31857/S0030157421020039

ВВЕДЕНИЕ

Изучение океанского гидротермального рудообразования в пределах Срединно-Океанических хребтов (СОХ) проводится в настоящее время как в ходе научных морских геолого-геофизических исследований, так и в рамках выполнения поисково-разведочных контрактов, заключенных семью странами (включая Российскую Федерацию) с Международным органом по морскому дну [44].

Значительный фактический материал, накапливаемый в экспедициях с применением высоко разрешающих съемок морского дна, свидетельствует о георазнообразии сульфидного оруденения. Георазнообразие определяется, главным образом, различным сочетанием тектонических и магматических процессов на разных иерархических уровнях – от глобального уровня срединных хребтов с разной скоростью спрединга до локального уровня отдельных сегментов внутри хребтов

[10, 23]. Данные различия отражаются на масштабах накопления рудного вещества и на вариациях состава руд, формирующихся в различных геологических обстановках [12, 15, 21].

Помимо различий в размерах и в составе рудных тел отмечены вариации форм их проявления на морском дне [12, 21]. Интерпретация имеющихся данных по морфологии гидротермальных рудных скоплений и анализ причин, определяющих это разнообразие, является первой задачей данной статьи. Основные материалы по морфологии гидротермальных построек собраны в северной приэкваториальной зоне Срединно-Атлантического хребта (САХ), входящей в пределы Российского Разведочного Района.

Вторым вопросом, также связанным с различиями протекания рудообразующего процесса в разных геологических обстановках, является внутреннее строение гидротермальных рудных

построек. В отличие от морфологии рудных тел, описываемой на основании их наблюдения с поверхности с помощью высокоразрешающих батиметрических и визуальных съемок, материалы для анализа внутренней структуры весьма ограничены, поэтому имеющиеся реконструкции чаще всего носят модельный характер. При этом именно внутреннее строение рудных тел определяет возможность оценки их ресурсов, являющихся ключевым параметром для дальнейшего принятия решения об освоении глубоководных сульфидных руд.

МОРФОЛОГИЯ РУДНЫХ ТЕЛ, СВЯЗАННЫХ С БАЗАЛЬТАМИ

Классической формой проявления сульфидных рудных образований являются изометричные холмы, увенчанные трубами (курильщиками), продукты разрушения которых слагают основную массу этих холмообразных построек. Небольшие (максимально – первые десятки метров в диаметре) рудные холмы на базальтовом основании были впервые описаны на Восточно-Тихоокеанском поднятии (ВТП) с момента их открытия в конце 70-х гг. XX в. [3, 6, 22]. На Срединно-Атлантическом хребте классическим примером гидротермальной постройки является более крупный по сравнению с ВТП т.н. Активный холм (Active Mound) диаметром 200 м и высотой 50 м, расположенный в пределах гидротермального поля ТАГ на 26° с.ш. Поле ТАГ было открыто в экспедиции под руководством П. Роны в 1985 г. [36] и изучено с глубоководного аппарата МИР российскими геологами через два года после его открытия [7]. Последующие открытые гидротермальные поля на САХе, такие как Брокен Спур, Снейк Пит и многочисленные неактивные рудные тела в пределах поля ТАГ, также характеризовались холмообразными формами сульфидных построек. Все названные гидротермальные поля и рудные постройки располагаются на базальтовом основании.

МОРФОЛОГИЯ РУДНЫХ ТЕЛ, СВЯЗАННЫХ С ГАББРО-ПЕРИДОТИТАМИ

В 1994 г. в пределах медленнospрединговых хребтов российскими геологами был открыт новый тип сульфидного оруденения [1]. В отличие от ранее известных рудных полей, которые пространственно и генетически связаны с базальтовым вулканизмом, сульфидные руды открытого поля Логачев (14°45' с.ш., САХ) залегают на глубинных породах габбро-перидотитового состава. Как выяснилось позже, эти интрузивные породы выводились на поверхность морского дна вдоль глубинных пологозалегающих разломов (детачментов), формируя при этом т.н. внутренние оке-

анические комплексы (oceanic core complex). Был сделан вывод о том, что количество “магматических” сегментов САХ, имеющих симметричный характер аккреции, примерно равно количеству “тектонических” сегментов, в которых преобладающую роль играют тектонические процессы, приводящие к асимметричному наращиванию земной коры с образованием внутренних океанических комплексов [10, 18, 23].

Постепенно количество рудных полей, найденных в пределах “тектонических” сегментов, увеличивалось. Большая часть рудных объектов, открываемых в пределах САХ, связана именно с “тектоническими” сегментами и с габбро-перидотитовыми породами внутреннего океанического комплекса. Помимо поля Логачев, к ним относятся рудные поля Рейнбоу, Победа, Семенов, Ириновское, Ашадзе, Коралловое, Молодежное, Нибелунген и ряд других объектов.

Несмотря на небольшое количество детальных исследований рудных полей нового типа, начали появляться данные о том, что строение рудных тел, залегающих на габбро-перидотитах, не ограничивается классической холмообразной формой.

Основной особенностью строения рудных тел в данном случае является их уплощенная по сравнению с классической холмообразной форма. Впервые на эту особенность рудных тел, залегающих на глубинных породах, было обращено внимание в публикации И. Фуке с соавторами [21] на основе изучения рудных тел полей Рейнбоу и Ашадзе (рис. 1); последующие наблюдения рудных тел узлов Семенов и Победа в той же северной приэкваториальной зоне САХ подтвердили отмеченную специфику в морфологии этого типа сульфидного оруденения. Одним из следствий данного наблюдения, имеющего важное значение при оценке ресурсов, является прогнозируемое уменьшение по сравнению с “базальтовыми” обстановками мощности сульфидных залежей, связанных с ультрабазитами. Можно рассчитывать, что буровые работы, планируемые на этих рудных телах, позволят получить важные дополнительные данные и уточнят предположения, основанные в настоящее время только на моделировании, поскольку реальное изучение рудных тел на ультрабазитах проводилось только с их поверхности, обнажающейся на морском дне.

Предполагается, что причиной изменения формы рудных тел является смена характера гидротермальной разгрузки, которая, в свою очередь, определяется степенью проницаемости вмещающих пород. Гидротермальные системы, связанные с менее проницаемыми базальтами, характеризуются сфокусированным/струйным характером разгрузки гидротермального флюида, и рудные тела в этой “базальтовой” обстановке представлены высокими холмообразными по-

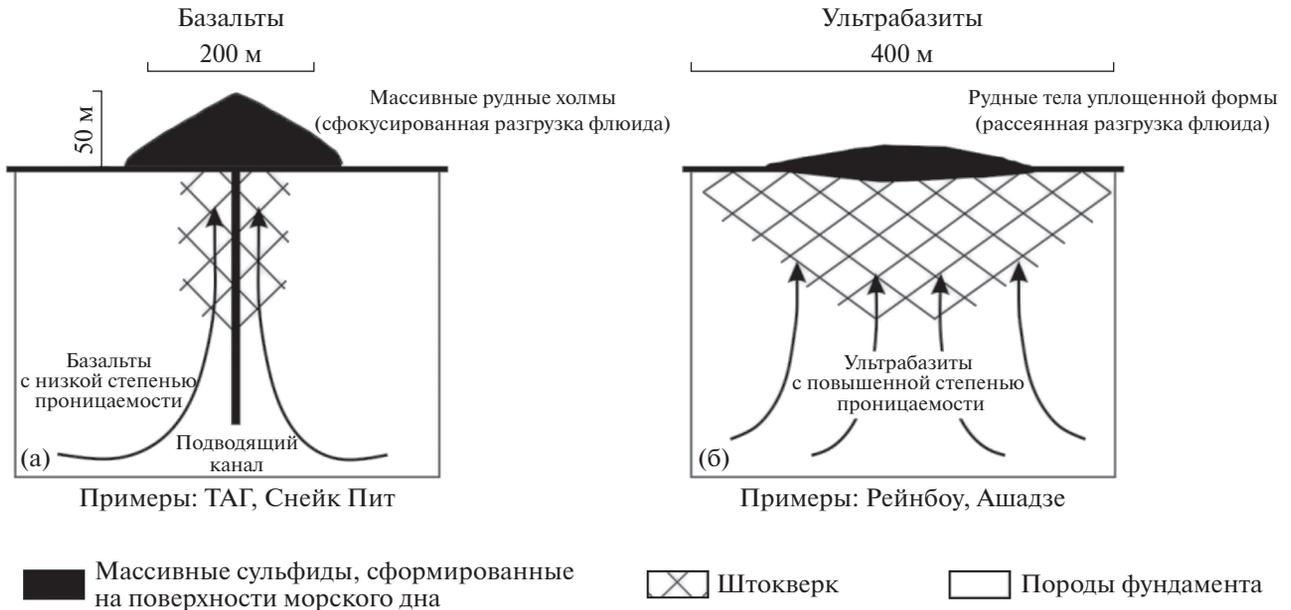


Рис. 1. Различие в морфологии гидротермальных построек, формирующихся на базальтах (а) и на ультрабазитах (б) (по [21] с изменениями).

стройками, сформированными по описанному выше сценарию. Высокая проницаемость ультраосновных пород, в особенности подвергшихся интенсивной серпентинизации, определяет рассеянный/диффузный характер разгрузки и, как следствие, уплощенную форму рудных тел, залегающих на серпентинизированных перидотитах и габбро.

Уплощенные холмы рассматриваются в качестве первичных структур, формирующихся в результате гидротермальной деятельности в “ультрабазитовой” обстановке. Предполагается, что в определенных условиях могут образовываться структуры, имеющие вторичный, наложенный характер [16].

К вторичным структурам можно отнести т.н. “дымящиеся кратеры” (smoking craters), описанные российскими и зарубежными авторами в пределах гидротермальных полей Северной Атлантики – Логачев и Ашадзе [2, 20, 31, 34] и Южной Атлантики – Нибелунген [26, 28]. Наиболее наглядное изображение кратера было получено в результате проведения высокоразрешающей батиметрической съемки района гидротермального поля Ашадзе-2 (рис. 2).

Размеры подобных кратерообразных структур, обнаруженных в различных гидротермальных полях, примерно одинаковы: диаметр составляет 20–30 м, глубина – 3–5 м. Предполагается, что формирование кратера могло быть связано со сверхвысоким подповерхностным флюидным давлением, приведшим к взрыву и разрушению ранее существовавшего на этом месте холма. Дру-

гими версиями формирования подобной структуры может быть подповерхностное растворение первичных метастабильных минералов гидротермального генезиса (ангидрит?) либо вымывание тонкодисперсных рыхлых отложений с последующим обрушением вышележащих масс рудного материала [33]. Первая (“взрывная”) версия тем не менее представляется более убедительной, поскольку в ее пользу свидетельствует наличие explosивного материала на флангах кратерообразных структур.

Вторая разновидность вторичных структур представлена куполом/холмом, покрытым системой трещин. Подобная форма, названная структурой “хлебной корки” (bread crust), была описана при изучении гидротермального поля Ашадзе-1 [30]. Диаметр купола (25 м) примерно равен диаметру кратера поля Ашадзе-2, а высота составляет несколько метров (рис. 3).

В отличие от кратеров предположений о формировании подобных растрескавшихся купольных структур в опубликованных источниках пока не имеется.

По нашему мнению, образование растрескавшихся куполов также связано со сверхвысоким подповерхностным флюидным давлением внутри гидротермального холма. Однако результатом давления стал не взрыв с формированием кратера, а растрескивание и медленное высачивание флюида по образовавшимся трещинам. Очевидно, что два возможных описанных сценария зависят от состояния и свойств исходного материала, слагающего холм: в случае, если этот материал

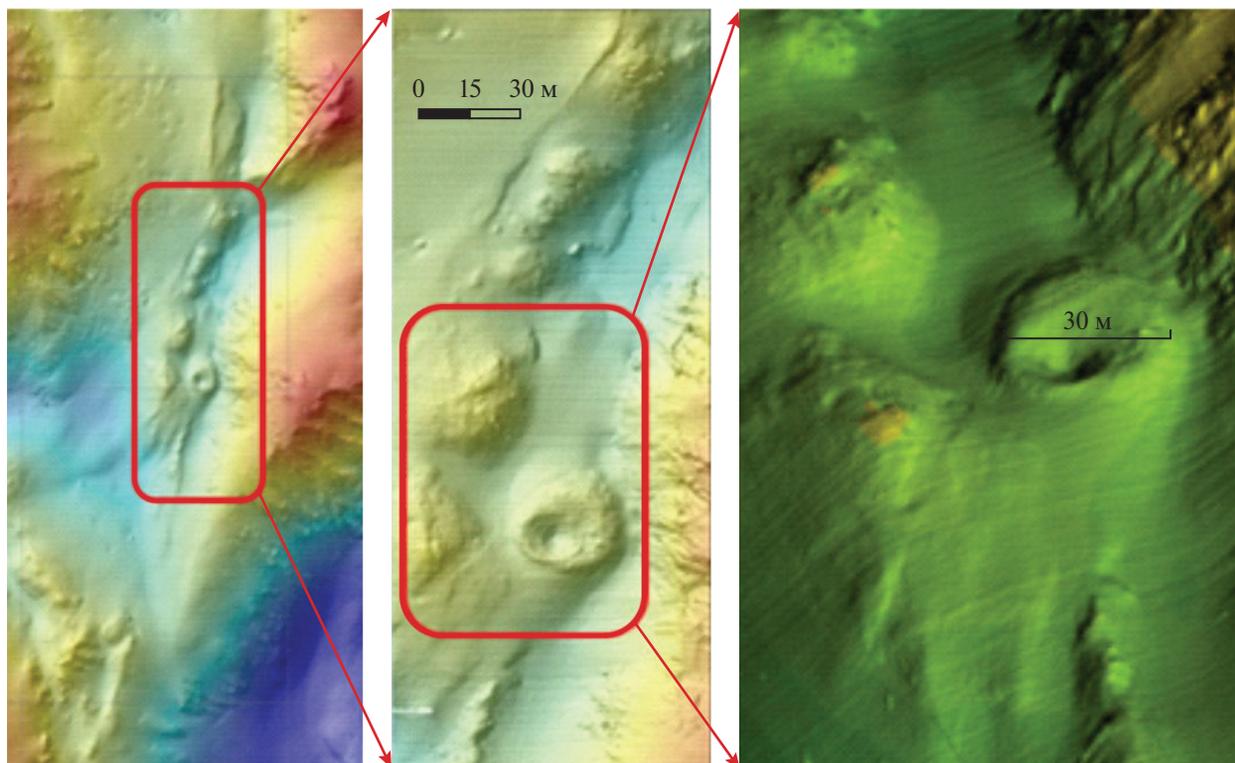


Рис. 2. Цепь гидротермальных холмов и кратер в районе поля Ашадзе-2 ($12^{\circ}59'$ с.ш., САО). Материалы батиметрической съемки с ROV Victor, российско-французская экспедиция Serpentine, 2007 г.

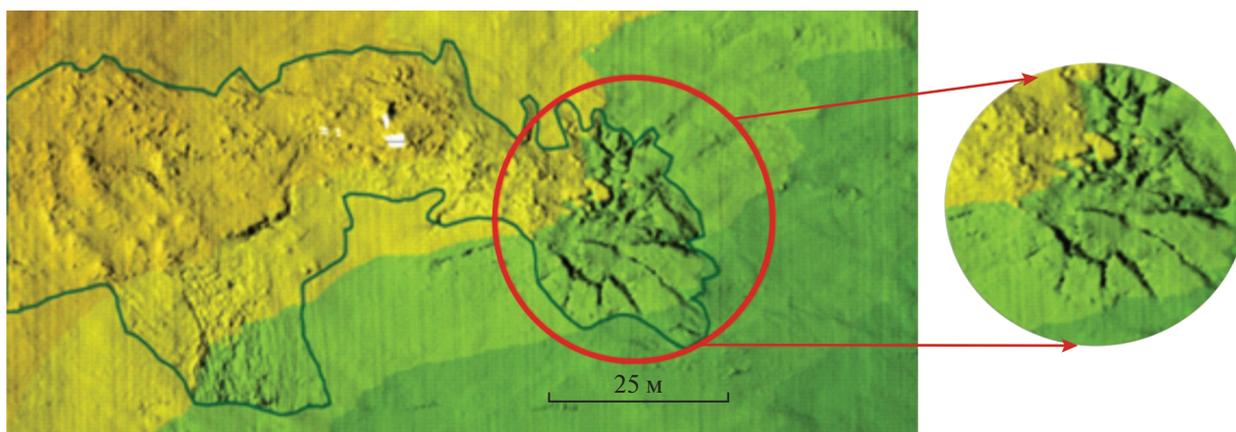


Рис. 3. Контур гидротермального поля Ашадзе-1 с растрескавшимся куполом в восточной части. Материалы батиметрической съемки с ROV Victor, российско-французская экспедиция Serpentine, 2007 г.

представлен однородной прочной массой, бронирующей внутреннее давление, происходит взрыв, а в случае наличия неоднородностей и ослабленных зон – растрескивание и последующая “спокойная” разгрузка. Иллюстрация обоих сценариев в плане и в разрезе приведена на рис. 4 и 5.

Таким образом, в зависимости от характера материала, слагающего гидротермальный холм,

его последующая эволюция и образование вторичных структур при нарастающем внутреннем флюидном давлении может идти двумя путями: быстрому взрыву с образованием кратера (1) и медленному высачиванию по образовавшимся трещинам в купольной структуре (2). Во втором случае растрескавшийся купол можно рассматривать в качестве “несостоявшегося кратера” (failed crater).

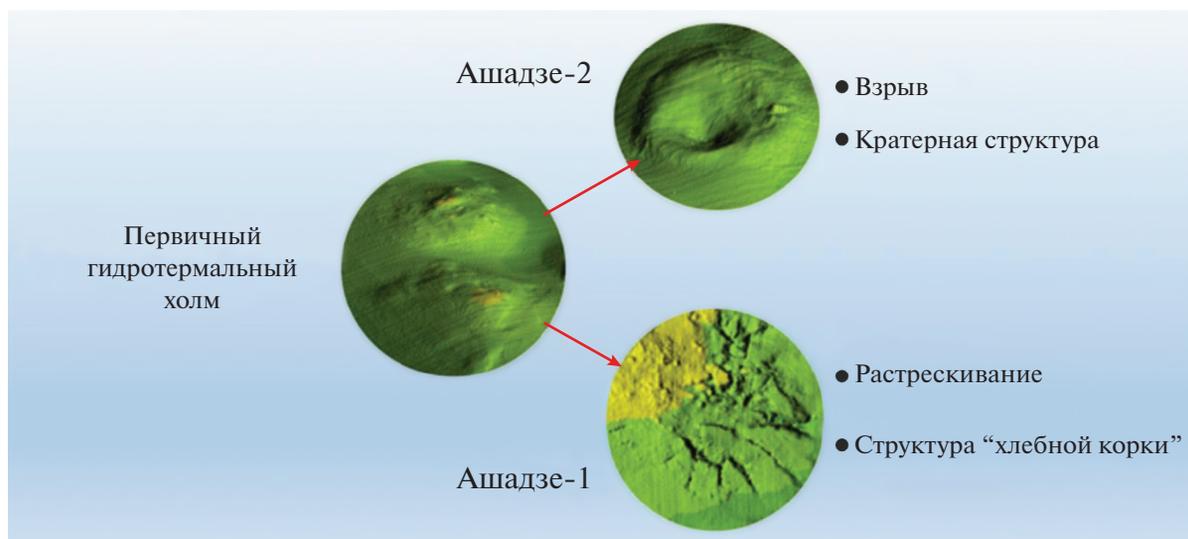


Рис. 4. Два сценария эволюции гидротермальных холмов: план.

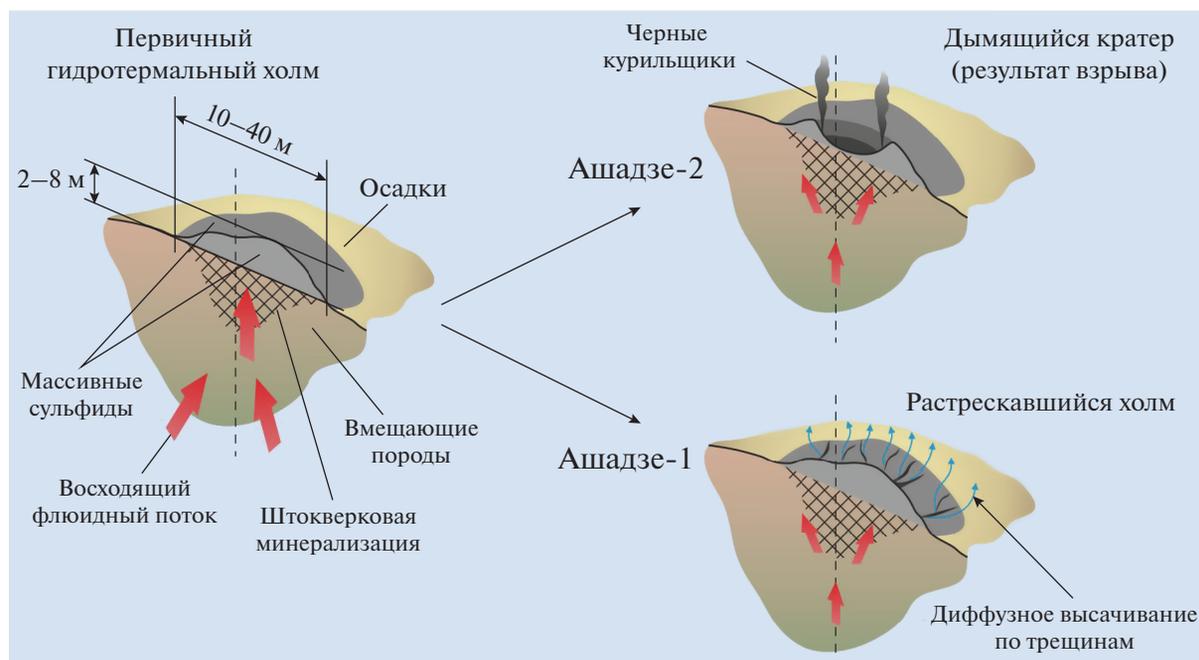


Рис. 5. Два сценария эволюции гидротермальных холмов: разрез.

Другим примером проявления диффузного характера гидротермальной разгрузки на ультрабазитовом основании является скопление многочисленных (более десяти на м²) невысоких (20–30 см) курильщиков на цоколе небольшой мощности (10–20 см), сложенном также гидротермальными образованиями и перекрывающим, в свою очередь, гидротермально измененные вмещающие породы ультраосновного состава (серпентиниты). Подобное скопление мелких курильщиков, названное “chimney forest”, обнару-

жено к настоящему времени только в пределах поля Ашадзе-1 (рис. 6). Предполагается, что оно может быть характерно для начальной стадии формирования гидротермальной системы и рудных построек. Проводимые датировки образцов сульфидных руд в пределах северной приэкваториальной зоны САХ свидетельствуют о среднем возрасте оруденения в 50–60 тыс. лет [14]. При этом максимальный возраст сульфидов поля Ашадзе-1, включающих скопление мелких курильщиков, составляет всего 7.2 тыс. лет, что сви-



Рис. 6. Гидротермальное поле Ашадзе-1. Скопление мелких курильшиков с маломощным цоколем гидротермальных отложений на серпентизированных перидотитах. Рассеянная гидротермальная активность, гидротермальная фауна (фото с ROV Victor, российско-французская экспедиция Serpentine, 2007 г.).

детельствует о ранней стадии развития этой рудообразующей системы и подтверждает выдвинутое предположение.

Учитывая интенсивный характер исследований гидротермальных систем и нарастающее поступление материалов, в т.ч. по морфологии рудных тел, можно быть уверенным, что приведенными выше формами разнообразие рудных построек не исчерпывается, и по мере развития глубоководных исследований будут открыты иные морфологические типы гидротермальных образований.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ РУДНЫХ ТЕЛ

Важнейшим аспектом изучения сульфидного оруденения, имеющим как теоретическое, так и практическое значение, является вопрос внутреннего строения рудных залежей. Наиболее надежным источником данных для его выяснения и получения объемных (3D) моделей рудных тел является бурение. Информация о буровых проектах и результатах их проведения приводится в табл. 1. По данным международной организации изучения СОХ ИнтерРидж, к середине 2020 г. известно более 700 подтвержденных или предполагаемых гидротермальных полей [45]. Даже с учетом того, что не все гидротермальные поля включают в себя сульфидное оруденение, доля рудных объектов, на которых осуществлены буровые проекты, составляет немногим более 1%.

Максимальное количество скважин (около 300) пробурено в первом десятилетии нынешнего столетия в островодужной зоне вблизи о. Новая Гвинея, главным образом в пределах лицензионных участков компании Наутилус Минералз. В 90-х гг. прошлого века в рамках Проекта Глубоководного Бурения (ODP) были пробурены рудные тела на САХ – на полях ТАГ и Снейк Пит, а также на хребтах Хуан де Фука (Миддл Вэлли) и Горда (трог Эсканаба). В островодужной обстановке трога Окинава было осуществлено бурение как с бурового судна (проект IODP), так и с помощью буровых станков, установленных на дне. Аналогичный проект был выполнен в Тирренском море на подводной горе Палинуро. Последние буровые работы с использованием бурового станка, установленного на поверхности дна, проводились на неактивных холмах поля ТАГ в ходе европейского проекта Blue Mining в 2018 г. Этим список буровых проектов в зонах сульфидного оруденения к настоящему времени исчерпывается.

При рассмотрении полученных материалов о внутренней структуре рудных тел принципиальным является вопрос о наличии массивного оруденения под океанским дном и/или под “палеодном” – гипотетической субгоризонтальной поверхностью, ограничивающей холмообразные рудные тела с нижней их части и предположительно фиксирующей границу руда–порода в момент начала процесса рудоотложения. Как следует из таблицы, бурение под палеодно было осуществлено только в

Таблица 1. Бурение сульфидных рудных полей: характеристика проектов и полученные результаты

Район работ	Проект Тип бурения	Структурная обстановка	Вмещающие породы	Результаты	Источник
SAX Поле TAG Активный холм	ODP Leg158	COX	Базальты	17 скважин Глубина бурения – до 125 м (под палеодно)	[24]
SAX Поле TAG Неактивные холмы	Blue mining RockDrill-2	COX	Базальты	8 скважин Глубина бурения – до 12.5 м (до палеодна)	[13, 28]
SAX Поле Логачев-1	RockDrill-2	COX	Ультрабазиты	9 скважин Глубина бурения – до 10.5 м	[32]
SAX Поле Логачев-1	ДИП Океан	COX	Ультрабазиты	7 скважин Мелкое бурение – до 3 м	[11]
Хр. Хуан де Фука Миддл Вэлли Холмы VHMS, ODP	ODP Leg 139, 169	COX	Осадки	7 скважин Глубина бурения – до 500 м (под палеодно)	[42]
Хр. Горла Трог Эсканаба	ODP Leg 169	COX	Осадки	6 скважин Глубина бурения – до 404 м	[19]
Море Бисмарка Котл. Манус	ODP Leg 193	Задуговая котловина	Базальты, андезиты, дациты	1 скважина Глубина бурения – 206 м	[38]
Море Бисмарка Котл. Манус	RockDrill-1	Задуговая котловина	Базальты, андезиты, дациты	10 скважин Мелкое бурение – до 5 м	[31]
Море Бисмарка Котл. Манус Поле Сольвара-1	4 буровых проекта Seacore R100 RovDrill 1-3	Задуговая котловина	Базальты, андезиты, дациты	293 скважины Глубина бурения – до 35.8 м (под палеодно) Общая длина керна >3000 м	[26]
Новоирландская котл. Подв. гора Кониал	RockDrill-1	Островная дуга	Базальты, андезиты, дациты	39 скважин Мелкое бурение – до 5 м	[31]
Трог Окинава Центральная часть Поле Iheya North	IODP Leg 331	Задуговая котловина	Андезито-базальты и риолит-дациты, перекрытые осадками	5 скважин Глубина бурения – до 128 м	[39, 41]
Трог Окинава Центральная часть Поле Izena Hole	Погружной буровой станок	Задуговая котловина	Осадки	9 скважин Глубина бурения – до 200.5 м Общая длина керна 834 м	[29, 37, 40]
Тирренское море Подв. гора Палинуро	RockDrill-1	Островная дуга	Осадки	11 скважин Глубина бурения – до 13.5 м	[35]

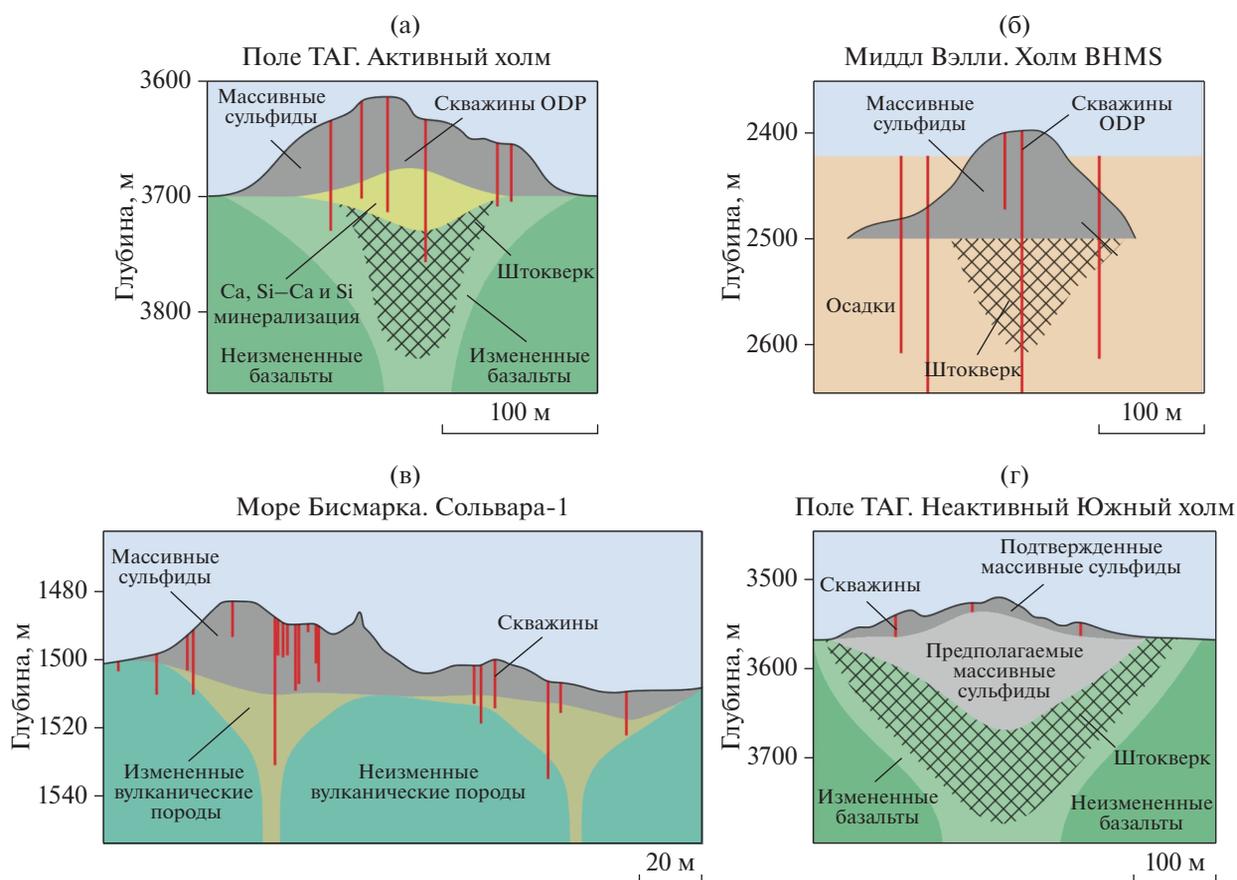


Рис. 7. Внутреннее строение океанских рудных залежей, реконструированное по результатам бурения (а–в) и по геофизическим данным (г). (а) – по данным [24], (б) – по данным [43], (в) – по данным [27], (г) – по данным [29].

нескольких проектах. Наиболее информативные результаты были получены в трех из них: в рамках программы глубоководного бурения – на поле ТАГ (1) и в районе Миддл Вэлли (2), а также на рудном теле Сольвара-1 (3). Результаты этих проектов, приведенные на рис. 7а–в, свидетельствуют о смене массивных руд, располагающихся над палеодном, прожилково-вкрапленным (штокверковым) оруденением ниже поверхности палеодна. Это характерно для рудных холмов, залегающих как на магматическом (ТАГ, Сольвара), так и на осадочном (Миддл Вэлли) фундаменте. Можно предположить, что при формировании массивных сульфидных залежей на осадочном основании их продолжение под палеодно более вероятно, чем в случае, когда вмещающие породы представлены магматитами. Кроме того, допускается формирование рудных тел внутри осадочной толщи, а не на ее поверхности (трог Окинава) [25]. Однако, учитывая тот факт, что рудные тела Российского Разведочного Района связаны в подавляющем большинстве с магматическими породами, наибольший интерес представляет именно эта геологическая обстановка.

Помимо прямых геологических данных о внутренней структуре рудных тел, имеются модельные построения, базирующиеся на геофизических данных – электроразведочных и сейсмических [29]. Б. Мертон и соавторы [29] предполагают наличие массивных, а не прожилково-вкрапленных сульфидов под палеодном в объеме, не уступающем объему залежи над ним. Данная модель основана на данных, полученных при изучении неактивных холмов поля ТАГ (рис. 7г). При этом возникает вопрос о механизме формирования подповерхностной залежи, который должен отличаться от процесса формирования рудного холма за счет образования сульфидных минералов в зонах гидротермальной разгрузки на контакте высокотемпературных высокоминерализованных флюидов с холодной морской водой. В цитированной выше работе [29] такой механизм не предложен, тогда как ряд других авторов предлагают рассматривать в этом качестве процессы метасоматоза. Признаки метасоматического процесса замещения вмещающих пород рудным материалом в пределах САХ продемонстрированы в ряде работ И.Ф. Габлиной с соавторами [4, 5], однако это касается рыхлых осадоч-

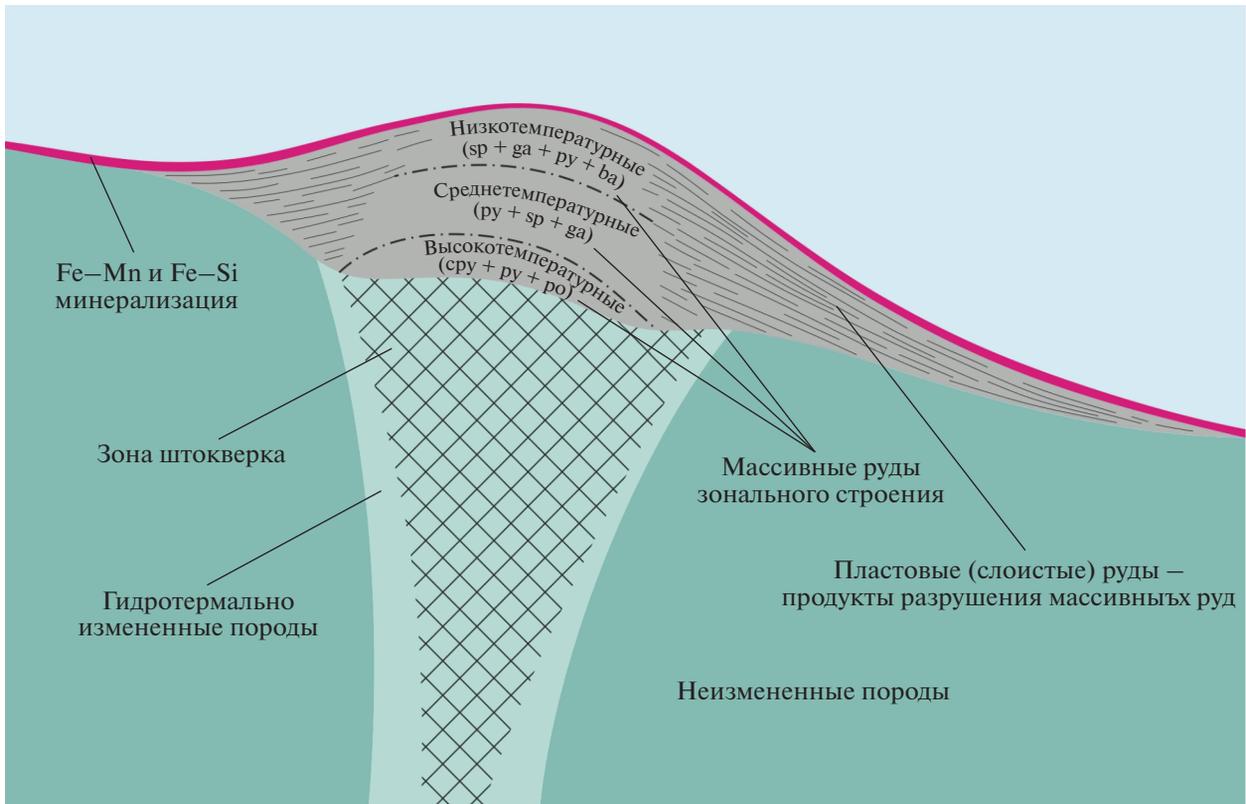


Рис. 8. Генерализованная схема строения колчеданных залежей (по [38] с упрощениями). Обозначения сульфидных минералов: py – пирит, сру – халькопирит, sp – сфалерит, ga – галенит, ро – пирротин, ba – барит.

ных отложений, замещающихся сульфидной минерализацией в процессе рассеянной гидротермальной разгрузки. Аналогичные процессы могут протекать и в вулканокластических осадках желоба Окинава [25, 30]. Что касается метасоматических процессов в магматических породах, то единственный пример базальтов, полностью переработанных в серноколчеданные руды, приводится Л.И. Лазаревой по материалам изучения рудного поля Краснов [8]. По ее мнению, минералого-геохимические данные, а также отмеченные области перекрытия составов изотопов руд и пород указывают на образование некоторой части серноколчеданных руд по базальтам. Это позволяет предположить, что руды поля Краснов имеют не только гидротермальную, но в какой-то части и гидротермально-метасоматическую природу.

Помимо данных по современным рудообразующим океанским гидротермальным системам, информация о структуре рудных тел и о наличии метасоматических зон в их строении также может быть получена из материалов изучения древних аналогов сульфидного оруденения – месторождений колчеданных руд. Несмотря на то что в генерализованной схеме строения колчеданных залежей такая зона четко не прослеживается (рис. 8), примеры замещения вмещающих пород под па-

леодном описаны в детальном обзоре М. Дойла и Р. Аллена [17], однако преобладающее большинство этих примеров описывают процессы замещения рудами *осадочных* вмещающих пород. В некоторых палеозойских колчеданных месторождениях Урала и Алтая в нижней части залежей также отмечены фрагменты метасоматических руд, на основании чего В.В. Масленников и В.В. Зайков [9] выделяют гидротермально-метасоматическую фацию колчеданных руд, указывая при этом, что данная фация и масштабы ее распространения недостаточно изучены.

Таким образом, в отсутствие прямых доказательств наличия масштабного метасоматического процесса, приводящего к формированию подповерхностных массивных сульфидов в океане, принимая данную версию для сульфидных залежей, связанную с магматическими породами (а именно такие залежи характерны для Срединно-Атлантического хребта), представляется преждевременным. Прямые свидетельства, как указывалось выше, могут быть получены в ходе бурения, планируемого многими морскими геологическими организациями в ближайшее время. Очевидно, что данные бурения позволят подтвердить или опровергнуть имеющиеся модельные постро-

ения в отношении наличия и природы подповерхностного массивного сульфидного оруденения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наращивание данных о строении сульфидных рудных тел в результате применения новых высоко разрешающих геолого-геофизических методов значительно расширило первоначальные представления как об их морфологии, так и о внутренней структуре. Помимо известных ранее холмов, ставших классическим примером гидротермальных построек, обнаружены и описаны уплощенные, близкие к пластовым рудные тела, крупные скопления невысоких курильщиков, структуры типа “дымящихся кратеров” и “растрескавшихся куполов”.

Разнообразие форм рудных построек определяется рядом факторов, важнейшими из которых являются:

- состав и свойства вмещающих пород;
- степень зрелости/возраст руд;
- процессы, протекающие внутри гидротермальной постройки после отложения руд.

Что касается внутренней структуры рудных тел, то вопрос о “продолжении” массивного оруденения под палеодно пока не решен; так же, как и предположение о возможной метасоматической природе гипотетической нижней части рудных скоплений.

В случае подтверждения ее наличия ресурсы сульфидных руд могут увеличиться вдвое по сравнению с имеющимися оценками рудных тел, ограниченных снизу палеодном. Таким образом, дальнейшее изучение структуры рудных залежей и восстановление истории их формирования имеет не только фундаментальное, но и практическое значение с точки зрения оценки ресурсов сульфидного оруденения в различных геологических обстановках и, в конечном счете, принятия решения об их освоении.

Благодарности. Приношу благодарность французским коллегам по экспедиции Serpentine и ее научному руководителю Иву Фуке. Кроме того, выражаю признательность Артему Бичу и Елене Митиной за подготовку иллюстраций.

Источники финансирования. Данная работа была частично выполнена за счет гранта РФФИ № 18-05-00861.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуев Б.Н., Кротов А.Г., Марков В.Ф. и др. Новое гидротермальное поле в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (14°45' с.ш.) // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 1. С. 75–79.
2. Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Викентьев И.В. и др. Новый тип современной минералообразующей системы “черные курильщики” гидротермального поля 14°45' Срединно-Атлантического хребта // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 68–90.
3. Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г. Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.
4. Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Наркевский Е.В. и др. Влияние гидротермально-метасоматических процессов на формирование современных сульфидных руд в карбонатных донных осадках САХ (19°–20° с.ш.) // Литология и полез. ископаемые. 2017. № 5. С. 387–408.
5. Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Наркевский Е.В. и др. Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа (17°07'–17°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полез. ископаемые. 2018. № 6. С. 475–500.
6. Краснов С.Г., Черкашев Г.А., Айнемер А.И. и др. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб.: Недра, 1992. 278 с.
7. Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Черкашев Г.А., Шашков Н.Л. Изучение гидротермального источника в Атлантическом океане из аппаратов “Мир” // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311. № 6. С. 1462–1467.
8. Марков В.Ф., Самоваров М.Л., Лазарева Л.И. и др. Отчет по объекту “Поисковые работы на глубоководные полиметаллические сульфиды на участке 16°38' с.ш. Срединно-Атлантического хребта; опытно-методические работы по программе ЮНЕСКО”. Ломоносов, 2007. 221 с.
9. Масленников В.В., Зайков В.В. Колчеданосные поля окраинно-океанических структур Урала (классификация, рудные фации, модель развития). Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. 92 с.
10. Порошина И.М., Черкашев Г.А. Морфотектоническое строение и сегментация северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта (Российский Разведочный Район) // Мировой океан. Том III. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане / Под ред. Лобковского Л.И., Черкашева Г.А. М.: Научный мир, 2018. С. 60–75.
11. Степанова Т.В., Семкова Т.А., Черкашев Г.А. Предварительные данные о строении основного рудного холма гидротермального поля “Логачев-1” (по данным неглубокого бурения) // Тезисы международного совещания по проекту “Р-Ридж”. СПб., 2005. С. 5–8.
12. Черкашев Г.А. Распространение и георазнообразие сульфидного оруденения // Мировой океан. Том III. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане / Под ред. Лобковского Л.И., Черкашева Г.А. М.: Научный мир, 2018. С. 54–59.
13. BLUE MINING. Public Report. Breakthrough Solutions for Mineral Extraction and Processing in Extreme Environments. 2018. 30 p.
14. Cherkashov G., Kuznetsov V., Kukxa K. et al. Sulfide geochronology along the Northern Equatorial Mid Atlantic Ridge // Ore Geol. Rev. 2017. P. 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.015>
15. Cherkashov G. Seafloor Massive Sulfide deposits: distribution and prospecting // Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations / Sharma R. (ed.). Springer International Publishing AG, 2017. P. 143–165. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0_4

16. *Cherkashov G.* Morphology and formation of SMS deposits in different geological settings. Sustainable Development of Seabed Mineral Resources: Environment, Regulations and Technologies UMC. Sanya, China. 2019.
17. *Doyle M., Allen R.* Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits // *Ore Geol. Rev.* 2003. № 23. P. 183–222.
18. *Escartin J., Smith D.K., Cann J. et al* Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere // *Nature*. 2008. V. 455. № 9. P. 790–794.
19. *Fouquet Y., Zierenberg R.A., Miller D.J. and Shipboard Scientific Party.* Chapter 6: Escanaba Trough: Central Hill (Site 1038) // *Proc. of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 169* / Fouquet Y., Zierenberg R.A., Miller D.J. (eds.). College Station, TX, 1998. P. 253–298.
20. *Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J.L. et al.* Serpentine cruise – ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // *InterRidge News*. 2008. V. 17. P. 15–19.
21. *Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al.* 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 deposit // *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges* / Rona P., Devey C., Dymont J., Murton B. (eds.). Washington, D.C., USA: American Geophysical Union, 2010. V. 188. P. 321–368.
22. *Francheteau J., Needham H.D., Choukroune P. et al.* Massive deep sea sulphide ore deposit discovered on the East Pacific Rise // *Nature*. 1979. V. 277. P. 523–528.
23. *German C.R., Petersen S., Hannington M.D.* Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? // *Chem. Geol.* 2016. V. 420. P. 114–126.
24. *Humphris S.E., Herzig P.M., Miller D.J. et al.* The internal structure of an active sea-floor massive sulphide deposit // *Nature*. 1995. V. 377. P. 713–716.
25. *Ishibashi J.-i., Ikegami F., Tsuji T., Urabe T.* Hydrothermal Activity in the Okinawa Trough Back-Arc Basin: Geological Background and Hydrothermal Mineralization // *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept* / Ishibashi J.-I. et al. (eds.). 2015. P. 337–358. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54865-2_27
26. *Koschinsky, A. Billings A., Devey C. et al.* Discovery of new hydrothermal vents on the southern Mid-Atlantic Ridge (4° S–10° S) during cruise M68/1 // *InterRidge News*. 2006. V. 15. P. 9–15.
27. *Lipton I.* Mineral resource estimate, Solwara 1 project, Bismarck Sea, Papua New Guinea. Technical Report for Nautilus Minerals Inc. 2008. N143-1101. URL: http://www.nautilusminerals.com/t/pdf/2008-02-01_Solwara1_43-101.pdf.
28. *Melchert B., Devey C., German C. et al.* First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat; the Nibelungen hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 275(1–2). P. 61–69.
29. *Murton B., Lehrmann B., Dutrieux A. et al.* Geological fate of seafloor massive sulphides at the TAG hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge) // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 107. P. 903–925.
30. *Nozaki T., Takaya Y., Nagase T. et al.* Subseafloor Mineralization at the Izena Hole, Okinawa Trough from the Aspect of Drill Cores Obtain by the CK16-05 Cruise (Exp. 909) // *Goldschmidt Abstracts*. 2018. № 1898.
31. *Ondreas H., Cannat M., Fouquet Y., Normand A.* Geological context and vents morphology of the ultramafic-hosted Ashadze hydrothermal areas (Mid-Atlantic Ridge 13° N) // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2013. V. 13.
32. *Petersen S., Herzig P., Kuhn T. et al.* Shallow Drilling of Seafloor Hydrothermal Systems Using the BGS Rock-drill: Conical Seamount (New Ireland Fore-Arc) and PACMANUS (Eastern Manus Basin), Papua New Guinea // *Mar. Georesour. Geotechnol.* 2005. V. 23. P. 175–193.
33. *Petersen S., Augustin R., Cherkashov G. et al.* Shallow-drilling of the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field at 14°45' N on the Mid-Atlantic Ridge using a new lander-type seafloor drill // *InterRidge News*. 2007. V. 16. P. 11–13.
34. *Petersen S., Kuhn K., Kuhn T. et al.* The geological setting of the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field (14°45' N, Mid-Atlantic Ridge) and its influence on massive sulfide formation // *Lithos*. 2009. V. 112. P. 40–56.
35. *Petersen S., Monecke T., Westhues A. et al.* Drilling shallow water massive sulfides at the Palinuro Volcanic Complex, Aeolian Island Arc, Italy // *Economic Geology*. 2014. V. 109(8). P. 2129–2157. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.8.2129>
36. *Rona P.A., Klinkhammer G., Nelson T.A. et al.* Black smokers, massive sulfides, and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge // *Nature*. 1986. V. 321. № 6065. P. 33–37.
37. *Sanada Y., Saito S., Hamada Y. et al.* Exploration on deep water hydrothermal sediments with logging while drilling at Okinawa trough (SIP-II) // Paper presented at 22nd Formation Evaluation Symposium of Japan 2016, Chiba, Japan.
38. *Sawkins F.J.* Massive sulfide deposits in relation to geotectonics // *Spec. Pap. Geol. Ass. Can.* 1976. V. 14. P. 221–240.
39. Shipboard Scientific Party, Leg 193 summary // *Proc. of the Ocean Drilling Program, Scientific results*. College Station, Texas, 2002. V. 193. P. 1–84.
40. *Takai K., Mottl M., Simon H.H. Nielsen and the IODP Expedition 331 Scientists.* IODP Expedition 331: Strong and Expansive Subseafloor Hydrothermal Activities in the Okinawa Trough Scientific Drilling, 2012. № 13.
41. *Yamasaki T.* The Role of Bimodal Magmatism in Seafloor Massive Sulfide (SMS) Ore-forming Systems at the Middle Okinawa Trough, Japan // *Ocean Sci. J.* 2018. V. 53(2). P. 413–436.
42. *Yeats C.J., Hollis S.P., Halfpenny A. et al* Actively forming Kuroko-type volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) mineralization at Iheya North, Okinawa Trough, Japan // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 84. P. 20–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.014>
43. *Zierenberg R.A., Fouquet Y., Miller D.J. et al.* The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit // *Nature*. 1998. V. 392. P. 485–488.
44. www.isa.jm.org
45. www.vents-data.interridge.org/about_the_database

Morphology and Internal Structure of Hydrothermal Ore Bodies Formed in Various Geological Settings of the World Ocean

G. A. Cherkashov^{a, b, #}

^a*Acad. Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, Saint-Petersburg, Russia*

^b*St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: gcherkashov@gmail.com*

A variety of information obtained during scientific research and exploration of seafloor massive sulfide (SMS) deposits include significant data on the morphology of ore bodies formed in various geological settings. On the example of hydrothermal fields in the Northern Mid-Atlantic Ridge, different hydrothermal ore structures are described, from the most common mound-shaped to rarely encountered “smoking craters”. An analysis is made of the processes that determine the morphology of ore bodies, including their changes during the evolution of hydrothermal ore-forming systems. In contrast to the study of SMS deposits outcropped at the seafloor the internal structure and the models of its formation are mostly hypothetical. In particular, this concerns the assumptions about the presence of massive sulfides and the mechanism of their formation below the paleo/subseafloor surface. It is obvious that the drilling results planned for the near future will allow confirming or refuting the existing models and changing the resource evaluation, which is currently based on surface sampling of SMS deposits.

Keywords: Mid-Oceanic ridges, hydrothermal ore formation, morphology of ore bodies, internal structure of ore bodies