

РУДООБРАЗУЮЩИЕ ПРИРОДНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 552.461:548.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ «ЧЕРНЫХ КУРИЛЬЩИКОВ», АССОЦИИРУЮЩИХ С МАНТИЙНЫМИ ГИПЕРБАЗИТАМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АТЛАНТИКЕ

Н.С. Бортников, В.А. Симонов*, Е.Е. Амплиева, О.О. Ставрова, И. Фуке**

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия*

** Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптога, 3, Россия*

*** IFREMER, GM, BP70, 29280, Plouzane, France*

Исследования флюидных включений в минералах из образцов сульфидных руд, отобранных на гидротермальных полях Ашадзе и Логачев во время рейса Серпентин на научно-исследовательском судне «Pourquoi Pas?» (2007 г.) дали возможность выяснить физико-химические условия рудообразующих систем «черных курильщиков», ассоциирующих с мантийными гипербазитами в Центральной Атлантике. Установлено, что изученные гидротермальные системы «черных курильщиков» отличаются друг от друга температурами минералообразования и соленостью флюидов. Выявлены также отличия от гидротермальных процессов, происходящих среди базальтовых комплексов, как в низкосрединговых (Срединно-Атлантический хребет), так и в высокосрединговых (Восточно-Тихоокеанское поднятие) срединно-океанических хребтах. Для гидротермальных полей Ашадзе и Логачев было выяснено, что температуры и соленость растворов во включениях в минералах изменяются шире, чем эти же характеристики, измеренные непосредственно для флюидов, изливающихся из жерл тех же построек на дно океана. Изучение флюидных включений показало, что сульфидные постройки Ашадзе и Логачева образовывались в результате действия как высокотемпературных (до 355°C), так и низкотемпературных (минимум 170°C) растворов. Соленость флюида во включениях (преобладают значения до 8 мас. %) более чем в два раза выше солености морской воды. В целом полученные данные позволили обосновать явление фазовой сепарации флюида в самой глубоководной субмаринной гидротермальной системе Ашадзе и значительно расширили наши представления о химизме и температуре флюидов, образующих сульфидные залежи на полях Ашадзе и Логачев в Центральной Атлантике.

Физико-химические условия, «черные курильщики», гидротермальные поля, флюидные включения, Срединно-Атлантический хребет.

THE PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS OF HYDROTHERMAL ORE-FORMING SYSTEMS OF “BLACK SMOKERS” ASSOCIATED WITH MANTLE ULTRABASITES IN THE CENTRAL ATLANTIC REGION

N.S. Bortnikov, V.A. Simonov, E.E. Amplieva, O.O. Stavrova, and Y. Fouquet

Study of fluid inclusions in minerals from sulfide ores sampled in the Ashadze and Logatchev hydrothermal fields during the Serpentine cruise of the R/V Pourquoi Pas? in 2007 gave an insight into the physicochemical conditions of ore-forming systems of “black smokers” associated with mantle ultrabasites in the Central Atlantic region. It was established that the studied hydrothermal systems differ in mineral formation temperatures, fluid salinity, and hydrothermal processes running within basaltic complexes in both low-spreading (Mid-Atlantic Ridge) and high-spreading (East Pacific Rise) mid-ocean ridges. It was shown for the Ashadze and Logatchev hydrothermal fields that the temperatures and salinity of inclusion solutions in the minerals vary over a wider range of values than those of fluids flowing out from the ridge vents onto the ocean floor. Study of fluid inclusions showed that the Ashadze and Logatchev sulfide buildings resulted from the action of both high-temperature (up to 355°C) and low-temperature (no lower than 170°C) solutions. The salinity of fluid in the inclusions (mainly 8 wt.%) is more than twice as high as the salinity of seawater. The data obtained substantiate the phase separation of fluid in the deepest-water submarine hydrothermal Ashadze system and give an idea of the chemical composition and temperature of fluids forming sulfide deposits in the Ashadze and Logatchev hydrothermal fields in the Central Atlantic region.

Physicochemical conditions, “black smokers”, hydrothermal fields, fluid inclusions, Mid-Atlantic Ridge

ВВЕДЕНИЕ

Важнейший вопрос в изучении гидротермальных систем, обнаруженных в глобальной системе срединно-океанических хребтов, — как широко изменяется химизм флюидов, изливающихся из горячих источников, и какие механизмы и параметры контролируют изменения их состава и температуры. Наши знания в этой области основывались главным образом на результатах краткосрочных периодических измерений на гидротермальных полях. Исследование флюидных включений в минералах привело к развитию представлений об эволюции солености и температуры флюидов на дне океанических бассейнов [Kusakabe et al., 1982; Le Bel, Oudin et al., 1982; Brett et al., 1987; Hannington, Scott, 1988; Peter, Scott, 1988; Наумов и др., 1991; Kelly et al., 1995; Von Damm, 1995; Бортников и др., 2004; Vanko et al., 2004].

На Срединно-Атлантическом хребте (САХ) между 12°58' и 37°51' с.ш. известно 13 гидротермальных полей, локализованных в различных геологических и геохимических условиях на глубинах от 850 (Менез Гвен) до 4080 м (Ашадзе) от поверхности океана (рис. 1). Открытие нового типа колчеданных сульфидных месторождений поля Логачев на 14°45' с.ш. [Batuev et al., 1994; Богданов и др., 1997] и Рейнбоу на 36°13' с.ш. [Fouquet et al., 1997], связанных с мантийными ультрабазитами, вызвало интенсивное изучение этого региона. В результате, несколько новых гидротермальных проявлений, приуроченных к ультраосновным и основным породам, выявлены российскими экспедициями на НИС «Профессор Логачев».

В последние годы организуются совместные международные экспедиции и большое внимание уделяется исследованиям на Срединно-Атлантическом хребте в области 13°00'—17°38' с.ш., которая характеризуется аномальными петрохимическими и геохимическими свойствами магматических пород и интенсивным проявлением гидротермальной активности. В частности, целью российско-французского рейса Серпентин на французском научно-исследовательском судне (НИС) «Pourquoi Pas?» (2007 г.) являлось детальное изучение геологических, геохимических и биологических процессов на гидротермальных полях, находящихся в ассоциации с комплексами мантийных ультраосновных пород в этом регионе (Ашадзе и Логачев) [Fouquet et al., 2008].

Гидротермальное поле Ашадзе, самое глубоководное из известных, расположенное на гипербазитах (12°58' с.ш.), было обнаружено в 2003 г. [Beltenev et al., 2003]. В этом районе выявлено несколько участков с сульфидными постройками (Ашадзе 1, 2, 3). Результатам исследований геологического строения и сульфидных руд поля Ашадзе посвящен ряд публикаций [Fouquet et al., 2007, 2008; Bortnikov, Simonov, 2009; Краснова и др., 2009; и др.].

Первые образцы сульфидных руд в районе 14°45' с.ш. САХ были подняты во время 9-го рейса НИС «Антарес» (1990 г.) [Геологические исследования..., 1991]. В 1993—1994 гг. в результате экспедиции на НИС «Профессор Логачев» было закартировано гидротермальное поле с массивными сульфидными рудами [Batuev et al., 1994]. В последние годы это гидротермальное поле Логачев и собранный здесь уникальный каменный материал привлекали к себе пристальное внимание многочисленных исследователей [Cherkashov et al., 2000; Богданов, Сагалевиц, 2002; Бортников и др., 2004; Borovski et al., 2007; Petersen et al., 2007; Fouquet et al., 2008; Bortnikov et al., 2010; и др.].

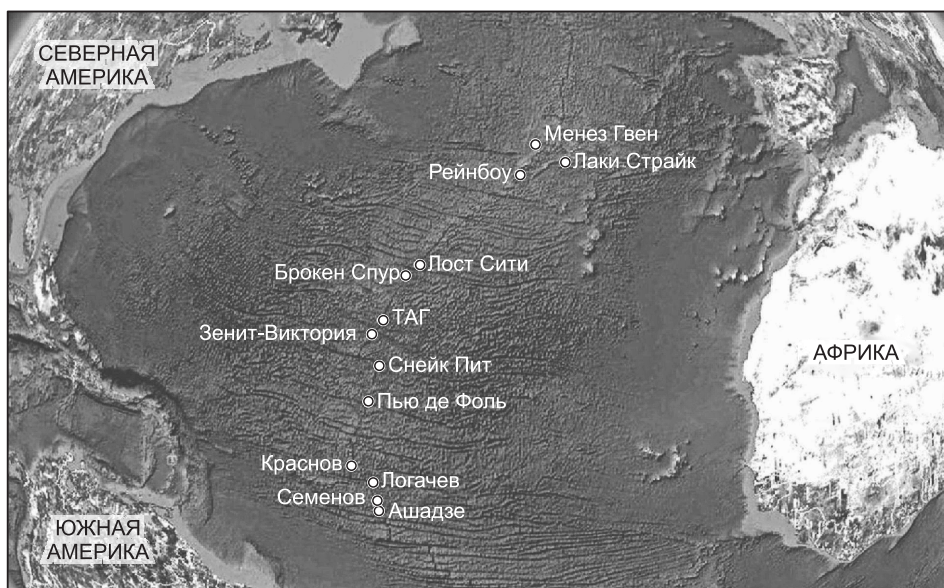


Рис. 1. Схема расположения гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте.

В 2007 г. французско-российская экспедиция Серпентин на французском НИС «Pourquoi Pas?» провела детальные исследования в районах гидротермальных полей Ашадзе и Логачев. Особенность этого рейса состояла в том, что для батиметрического изучения морского дна использовался модуль, позволяющий получить карты с высокой точностью, а наблюдения и отбор образцов сульфидных руд и гидротермального флюида осуществлялись с помощью глубоководного аппарата с дистанционным управлением «Victor 6000» [Fouquet et al., 2008].

Значительный объем каменного материала, собранного во время этой экспедиции, был исследован в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва) и в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). В данной статье приводятся результаты исследований флюидных включений в минералах из образцов сульфидных руд, отобранных на гидротермальных полях Ашадзе и Логачев в течение рейса Серпентин на НИС «Pourquoi Pas?».

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе изучения основное внимание уделялось методам анализа флюидных включений, позволяющим успешно решать задачи по выяснению физико-химических условий рудообразующих систем на современных и древних месторождениях различного типа [Бортников и др., 2004; Борисенко и др., 2006; Боровиков и др., 2009; Спиридонов и др., 2010; и др.] Фазовый состав флюидных включений исследовался под микроскопом, а поведение их при нагревании и охлаждении изучалось в термокамерах и криокамерах оригинальных конструкций [Симонов, 1993]. Для каждого из образцов, представляющих различные типы руд и минеральных ассоциаций в сульфидных постройках, было измерено до 100 значений температур гомогенизации и оценено около 50 значений концентраций солей во флюиде включений. Точность и достоверность измерений температур гомогенизации флюидных включений, плавления последних кристалликов льда и эвтектики контролировались повторными замерами. Погрешность измерения температуры гомогенизации составила $\pm 1^\circ\text{C}$, а измерений при охлаждении — $\pm 0.05^\circ\text{C}$ [Симонов, 1993]. Состав основных солевых компонентов растворов определялся по температурам эвтектик [Борисенко, 1977]. Концентрация солей в растворах, захваченных флюидными включениями, рассчитывалась по температурам плавления последних кристалликов льда [Bodnar, 1993]. Известно, что температуры гомогенизации флюидных включений представляют собой минимальные температуры минералообразования [Ермаков, Долгов, 1979; Roedder, 1984]. Поэтому истинные значения последних оценивались путем введения поправок, величина которых зависит от давления и солености растворов, к измеренным температурам гомогенизации. Для этого были использованы значения, рассчитанные нами путем согласования величин поправок на давление к температурам гомогенизации, полученных с помощью разных методик [Леммлейн, 1973; Наумов, 1982; Roedder, 1984].

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА СУЛЬФИДНЫХ ПОСТРОЕК НА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ АШАДЗЕ И ЛОГАЧЕВ

Гидротермальное поле Ашадзе. Применение новейшего высокоразрешающего многолучевого эхолота (RESON 7125), установленного на аппарате «Victor 6000», позволило впервые обнаружить в поле Ашадзе высокотемпературные гидротермальные источники — «черные курильщики» [Fouquet et al., 2008]. В этом поле найдены четыре проявления сульфидных построек на глубинах от 3300 до 4530 м. Два из них, Ашадзе 1 и Ашадзе 2, выявленные в рейсе Серпентин, — активные «черные курильщики», располагающиеся соответственно на глубинах 4080 и 3260 м. Ашадзе 1 приурочено к западному склону рифтовой долины САХ. Ее склоны и дно сложены серпентинизированными мантийными перидотитами и габбро, среди которых обнаружены редкие жилы плагиогранитов. Зоны активных сульфидных труб и холмов Ашадзе 1 длиной 150 м располагаются вдоль откоса, простирающегося с востока на запад. «Черные курильщики» Ашадзе 2 группируются в узком (шириной 70 м) трогее, вытянутом с севера на юг.

Сульфидные постройки Ашадзе 1 представлены главным образом расположенными на дне океана или на холмах отдельными и срощенными друг с другом неактивными, а также отдельными активными трубами и группами активных труб. Высота построек колеблется от нескольких сантиметров до 2 м. Из жерл некоторых труб изливаются струи высокотемпературных флюидов в виде черных дымов, а из стен просачиваются диффузные и мерцающие теплые воды. Особенность других источников состоит в том, что флюиды истекают не из сульфидных труб, а непосредственно из кратеров на дне океана и зародышей сульфидно-ангидритовых построек.

Активные трубы сложены преимущественно пирротином, сульфидами Cu и Fe, реже встречается сфалерит. Сульфиды цинка преобладают в неактивных или диффузных трубах. Шпилеобразные постройки имеют радиально-зональное строение: внешняя зона сложена сфалеритом, промежуточная состоит из пирротина с менее распространенными изокубанитом или изокубанитом и халькопиритом, внут-

ренную зону образуют халькопирит и изокубанит со сфалеритом. Ангидрит обнаружен во внешней зоне активных труб.

Наиболее детально и всесторонне исследовались образцы SE-DV-03-03 (12°58.3146' с.ш., 44°51.7972' з.д.) и SE-DV-04-20 (12°58.3468' с.ш., 44°51.7854' з.д.). Первый образец отобран из трубообразной постройки Лонг Чимни высотой 2 м, расположенной на сульфидном холме. Стенки трубы от 1 до 3 см толщиной. Внешняя зона (шириной 0.5 см) состоит из борнита и гидроокислов Fe, внутренняя — из халькопирита и изокубанита с гнездами ангидрита. Образец SE-DV-04-20 представляет собой фрагмент трубообразной постройки Эмбрио, сложенной в основном сульфидами Cu и Fe: изокубанитом и халькопиритом, которые частично замещены сульфидами Cu и борнитом во внешней части трубы. Незначительные количества сфалерита и ангидрита присутствуют в тонкой зоне шириной 1—2 см.

Гидротермальное поле Логачев находится в восточном борту рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта и приурочено к северо-западной серии разломов, вдоль которых расположено несколько отдельных сульфидных построек. Одна из построек представляет собой холмообразную залежь высотой 10—20 м, длиной ~ 200 м, шириной до 100 м. Большая часть ее неактивна, только в осевой зоне наблюдаются выходы высокотемпературных гидротермальных растворов — черных дымов.

В одних случаях растворы выходят на поверхность океанского дна из кратеров и воронок, внутри них обнаружены небольшие (до 20—50 см) сульфидные трубы «черных курильщиков». В других случаях высокотемпературные гидротермальные растворы изливаются из столбообразных сульфидных построек высотой до 3 м [Богданов, Сагалевич, 2002], большинство которых имеет концентрически-зональное строение. Минеральный состав построек следующий: пирротин, сфалерит, халькопирит, изокубанит, пирит, марказит, борнит, пентландит и ангидрит.

Детально были изучены следующие образцы сульфидных руд: SE-DV-06-8 (Логачев 1, постройка Квест) и SE-DV-07-29 (Логачев 2, постройка Анна-Луиза). Образец SE-DV-06-8 (14°45.1852' с.ш., 44°58.8330' з.д.) — это небольшие фрагменты активной трубы, состоящие из тонкозернистых халькопирит-изокубанитовых агрегатов, частично замещенных ковеллином. Толщина стенок трубы около 2.5 см. Внутренние стенки канала покрыты кристаллами изокубанита. Во внешней зоне трубы встречается ангидрит. Образец SE-DV-07-29 (14°45.0856' с.ш., 44°58.6601' з.д.) — крупный фрагмент активной постройки, образованный трубой с открытым каналом (1.5 × 6 см) и двумя более мелкими трубами, внутренние каналы которых заполнены агрегатами сульфидов Cu и Fe. Толщина стенок трубы колеблется от 1.5 до 2 см. Главные минералы, слагающие постройку, — изокубанит, халькопирит, ангидрит, второстепенные — борнит и ковеллин. Сульфидная труба имеет радиально-зональное строение. Изометричные скопления ангидрита встречаются во внешней зоне активной трубы.

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Детально были просмотрены все имеющиеся в нашем распоряжении образцы сульфидных руд из рудных построек гидротермальных полей Ашадзе и Логачев, но представительные данные по флюидным включениям удалось получить только в случае образцов SE-DV-03-03 и SE-DV-04-20 (Ашадзе 1), SE-DV-06-8 (Логачев 1) и SE-DV-07-29 (Логачев 2). Включения (рис. 2) были найдены в ангидрите, который, судя по взаимоотношениям с кристалликами сульфидов, формировался совместно с ними из единого рудообразующего раствора.

Ашадзе 1. В сульфидных рудах из построек этого поля первичные флюидные включения обнаружены в ангидрите. Их размеры — 5—50 мкм. Они располагаются равномерно в зернах этого минерала (см. рис. 2, А, Б). Преобладают двухфазовые включения с правильными плоскими и трубчатыми формами. Характерным является присутствие во включениях сульфидных фаз (см. рис. 2, А), что свидетельствует о захвате растущим ангидритом рудообразующего флюида, из которого одновременно идет кристаллизация сульфидной руды.

При охлаждении кристалликов ангидрита установлено, что растворы, содержащиеся во включениях, резко замораживаются от –35 до –40°C. Эвтектические температуры от –24.5 до –26.5°C указывают, что преобладающий растворенный компонент в захваченном флюиде — NaCl, но, возможно, в нем также участвует незначительное количество KCl. Последние кристаллики льда во включениях плавильсь от –3.2 до –5.1°C и от –3.2 до –4.4°C в обр. SE-DV-03-03 и SE-DV-04-20. Соленость, рассчитанная по этим данным, оказалась равной 5—7.8 и 5—7 мас. % NaCl-экв. во флюидах, отлагавших ангидрит соответственно в трубе Лонг Чимни и постройке Эмбрио (рис. 3). Флюидные включения в ангидрите из обр. SE-DV-03-03 при нагревании гомогенизировались в жидкую фазу при 265—310°C. В обр. SE-DV-04-20 можно выделить две группы включений с температурами гомогенизации соответственно от 210 до 250°C и от 260 до 320°C (рис. 4). Чтобы получить истинные параметры кристаллизации ангидрита, измеренные температуры гомогенизации скорректированы с учетом того, что флюидные включения были захвачены на глубине 4080 м от поверхности океана, т.е. при давлении около 410 бар. Оцененные

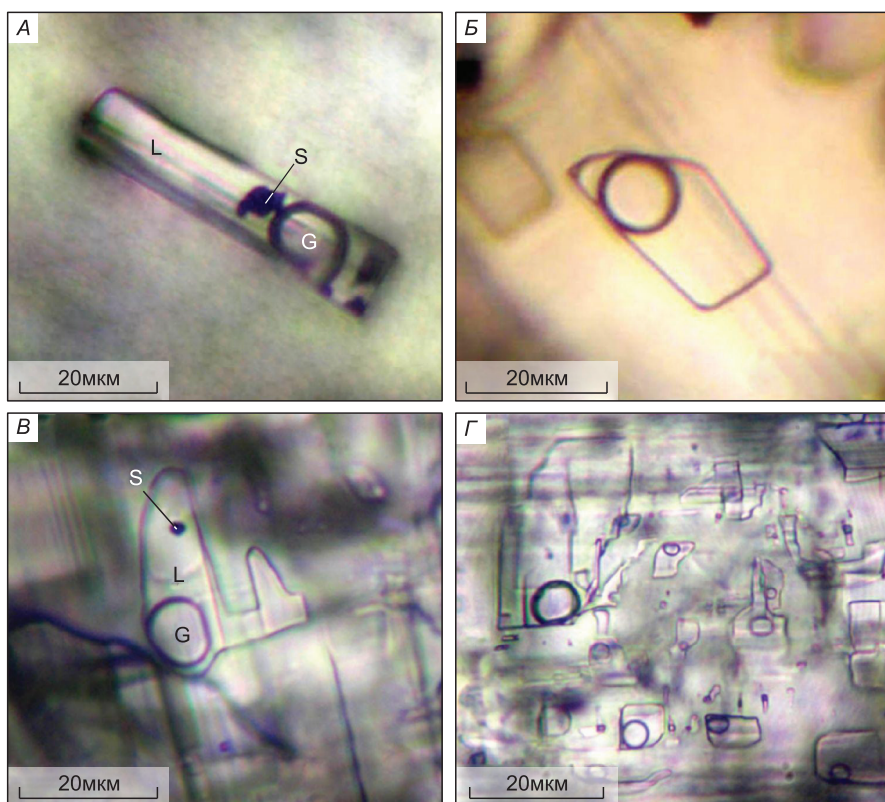


Рис. 2. Фотографии флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Ашадзе 1 (А, Б) и поля Логачев 1 (В, Г).

G — газовый пузырек, L — жидкость, S — кристаллики сульфидов (?!).

таким образом температуры флюидов, отлагавших минералы в постройках Лонг Чимнит и Эмбрио, составляли соответственно 295—345 и 235—355°C. Максимальные их значения хорошо согласуются с результатами прямых измерений температур (353—355°C) флюида, изливающегося из жерла сульфидной трубы Лонг Чимнит [Fouquet et al., 2008], но минимальные — заметно ниже их. Полученные данные могут свидетельствовать о значительных изменениях температур отложения ангидрита, возможно, из-за смешения флюида с окружающей холодной океанской водой. В целом температуры отложения минералов, оцененные по данным изучения флюидных включений (235—355°C), располагаются в интервале величин 106—370°C, измеренных для флюидов, истекающих из различных построек в Ашадзе 1.

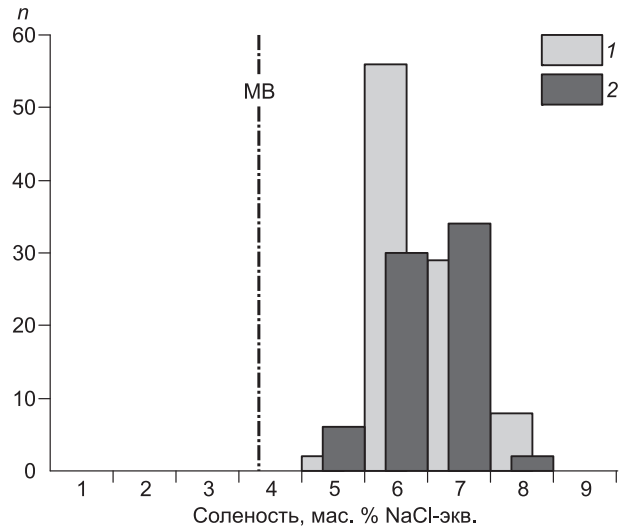
По соотношению значений солёности и температур данные по двум образцам перекрываются, но в случае постройки Эмбрио наблюдаются более широкие вариации температур гидротермальных растворов (рис. 5).

Логачев. В ангидрите из сульфидных руд гидротермального поля Логачев были найдены первичные флюидные включения размером 5—60 мкм, обладающие в основном плоскими, прямоугольными или трубчатыми формами. Большинство включений двухфазовые: прозрачная светлая жидкость + четкий круглый газовый пузырек (см. рис. 2, В, Г). Есть также включения с непрозрачными (сульфиды?!) кристаллическими фазами (см. рис. 2, Б). Наиболее представительные данные по флюидным включениям были получены при исследовании обр. SE-DV-06-08 (Логачев 1, постройка Квест) и SE-DV-07-29 (Логачев 2, постройка Анна-Луиза).

Криометрический анализ включений показал сходные характеристики растворов в разных постройках. При охлаждении кристалликов ангидрита флюидные включения резко замораживались от –36.5 до –41°C. Температуры эвтектики составили от –25 до –28°C, что свидетельствует о преобладании в составе растворов системы NaCl—H₂O с добавкой KCl. Судя по температурам плавления последних кристалликов льда (–3.7...–5.2°C), выделяется одна группа с солёностью 5.8—7.9 мас. % NaCl-экв., близкая по своим свойствам (5—7.8 мас. %) к флюидным включениям в ангидрите поля Ашадзе. Таким образом, значения концентраций солей в растворах включений из обр. SE-DV-06-08 и SE-DV-07-29 существенно выше солёности морской воды (рис. 6).

Рис. 3. Гистограмма значений солености растворов флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Ашадзе 1.

1, 2 — флюидные включения в ангидрите из обр. SE-DV-03-03, постройка Лонг Чимни и SE-DV-04-20, постройка Эмбрио соответственно. Здесь и далее n — количество анализов, МВ — морская вода.



Термометрические исследования включений в ангидрите из обр. SE-DV-06-08 свидетельствуют о двух интервалах температур гомогенизации: 190—240°C и 250—260°C (рис. 7). С учетом поправок на давление, согласно глубине расположения сульфидных руд (2900—3060 м), оценены реальные температуры гидротермальных систем постройки Квест: 210—260°C и 270—280°C.

По данным термометрии включений в ангидрите из обр. SE-DV-07-29 установлены три основных интервала температур гомогенизации (°C): 150—180, 190—220 и 230—260 (см. рис. 7). С учетом поправок на давление реальные температуры гидротермальных растворов в постройке Анна-Луиза следующие (°C): 170—200, 210—240, 250—280.

На диаграмме, показывающей соотношение температур гомогенизации флюидных включений в ангидрите с содержаниями солей в их растворах, отчетливо видно, что данные по двум изученным образцам в целом перекрываются. Можно отметить только относительно больший разброс характеристик для включений из обр. SE-DV-07-29 (рис. 8).

В основном эти температуры (до 280°C) значительно ниже полученных нами ранее данных по флюидным включениям в ангидрите из построек поля Логачев (270—315°C) [Симонов и др., 1997] и (270—350°C) [Бортников и др., 2004], а также меньше температур, измеренных для флюидов, непосредственно изливающихся из построек гидротермальных полей Логачев 1 и Логачев 2 (соответственно 359°C и 320°C) [Fouquet et al., 2008].

Соленость флюидов, отлагавших изученные постройки, также оказалась ниже значений, оцененных ранее во флюидных включениях из других образцов ангидрита из поля Логачев: от 9.9 до 15.2 мас. % NaCl-экв., а в нескольких включениях до 26 мас. % NaCl-экв. [Бортников и др., 2004]. Измерения показали, что солености флюида, изливающегося из жерл построек, и морской воды близки (535 ммоль). Из построек в

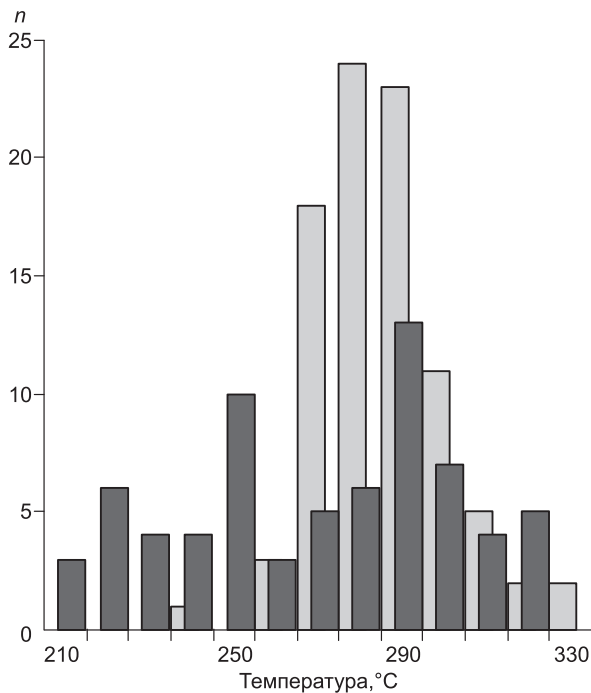


Рис. 4. Гистограмма значений температур гомогенизации флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Ашадзе 1.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

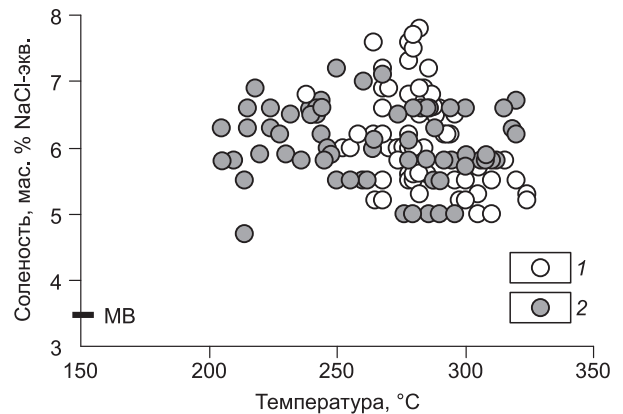


Рис. 5. Соотношение солености и температур гомогенизации флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Ашадзе 1.

1, 2 — флюидные включения в ангидрите из обр. SE-DV-03-03 и SE-DV-04-20 соответственно.

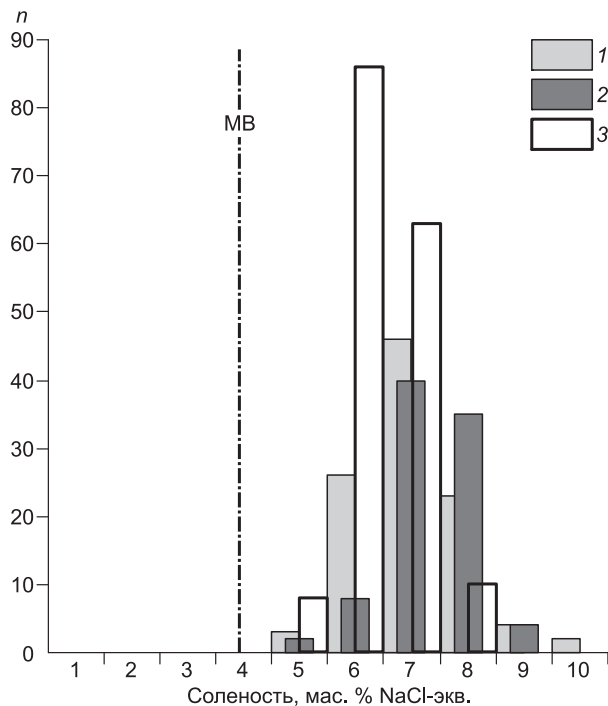


Рис. 6. Гистограмма значений солености растворов флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Логачев.

1—3 — флюидные включения в ангидрите из образцов: 1 — SE-DV-07-29, Логачев 2; 2 — SE-DV-06-8, Логачев 1; 3 — общее для SE-DV-03-03 и SE-DV-04-20 поля Ашадзе 1.

гидротермальном поле Логачев 2 изливался флюид, температура которого составила 309°C, а соленость — 140 ммоль [Fouquet et al., 2007].

Таким образом, проведенные исследования отчетливо свидетельствуют о том, что температура и соленость флюидов в двух изученных субмаринных гидротермальных системах различаются. Температуры гомогенизации флюидных включений в ангидрите из построек Квест и Анна-Луиза оказались ниже температур гомогенизации в минералах из активных сульфидных труб из поля Ашадзе 1 (см. рис. 7, 8). Однако в целом температуры минералообразования в гидротермальном поле Логачев достигали более высоких значений, а именно 365°C [Бортников и др., 2004].

Соленость флюидов, отлагавших сульфидно-сульфатные руды поля Рейнбоу, расположенном на Срединно-Атлантическом хребте и ассоциирующим с серпентинитами, равна 4.5—8 мас. %, в ряде случаев оказалась в два раза выше солености морской воды. Особенностью минералообразования в гидротермальном поле Рейнбоу являются широкие вариации температур отложения минералов — от 250 до 363°C [Симонов и др., 2000; Бортников и др., 2004]. Следует обратить внимание на отличие температуры флюидов и их солености в минералообразующих системах на САХ, ассоциирующих с базальтами. Было выявлено, что в гидротермальной системе Брокен Спур температура флюида была более высокой: она достигала 406°C, а изменялась от 260 до 406°C, тогда как соленость флюида была ниже (3—6.3 мас. % NaCl-экв.), чем во флюидах, связанных с мантийными породами [Бортников и др., 2004] (рис. 9).

Высокие температуры гомогенизации были выявлены при изучении флюидных включений в минералах из сульфидного холма ТАГ (Центральная Атлантика), они достигали 390°C [Petersen et al., 1998]. Минимальные же значения оказались ниже, чем те, что измерены для флюида из системы Брокен Спур, а именно 212°C. Отличительной особенностью флюида из гидротермальной системы оказалась его низкая соленость: она изменялась от 1.9 до 6.2 мас. % NaCl-экв. [Petersen et al., 1998] или от 1.2 до 5.1 мас. % NaCl-экв. [Tivey et al., 1998].

Значительными оказались различия в температурах и солености флюида на рассмотренных полях Ашадзе и Логачев от минералообразующих гидротермальных систем на высокосрединговом срединно-океаническом хребте — Восточно-Тихоокеанском поднятии (ВТП) [Бортников и др., 2007]. При нагревании флюидные включения в ангидрите из сульфидных построек на гидротермальном

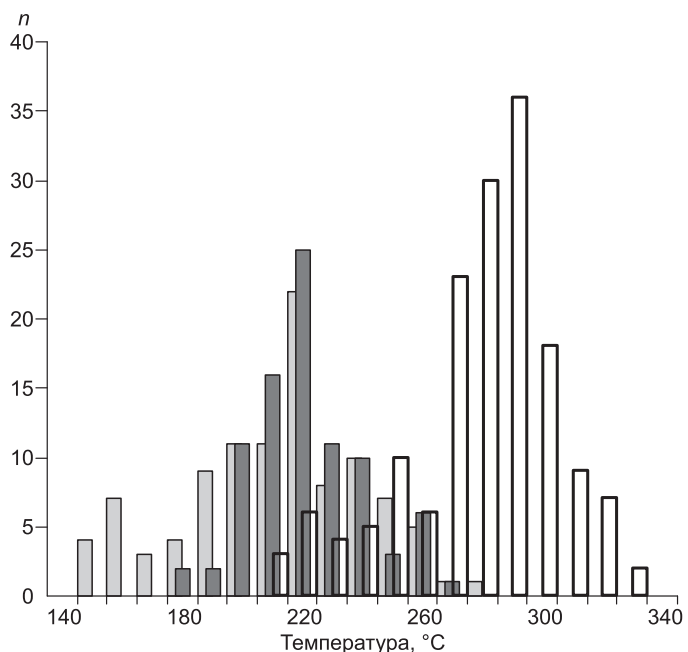


Рис. 7. Гистограмма значений температур гомогенизации флюидных включений в ангидрите из сульфидных руд поля Логачев.

Усл. обозн. см. на рис. 6.

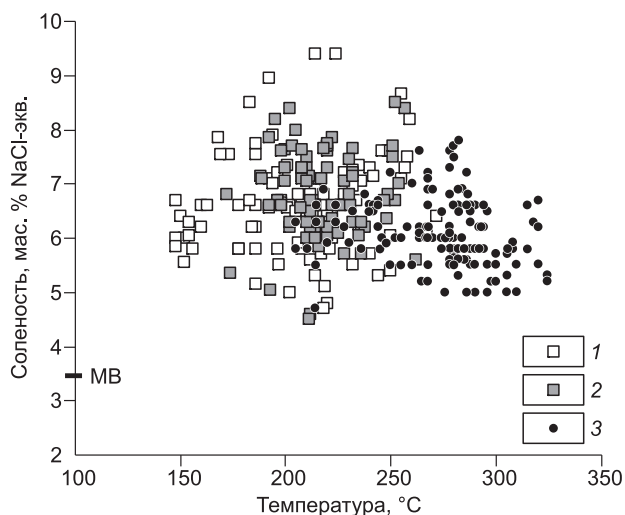


Рис. 8. Соотношение солёности и температур гомогенизации флюидных включений в ангидриде из сульфидных руд поля Логачев.

1—3 — флюидные включения в ангидриде из образцов: 1 — SE-DV-07-29, Логачев 2; 2 — SE-DV-06-8, Логачев 1; 3 — общее для SE-DV-03-03 и SE-DV-04-20 поля Ашадзе 1.

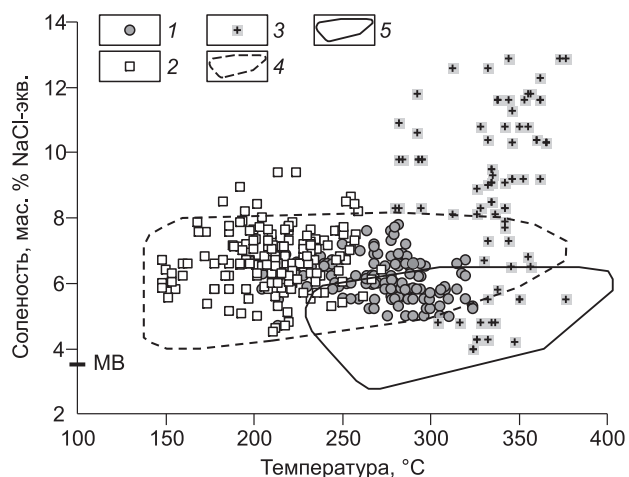


Рис. 9. Соотношение солёности и температур гомогенизации флюидных включений в ангидриде из сульфидных руд «черных курильщиков».

1—3 — флюидные включения в ангидриде из сульфидных руд гидротермальных полей: 1 — Ашадзе 1; 2 — Логачев 1 и Логачев 2; 3 — 9° с.ш. Восточно-Тихоокеанского поднятия; 4, 5 — области составов растворов флюидных включений в ангидриде из сульфидных руд гидротермальных полей Срединно-Атлантического хребта: 4 — Рейнбоу, 5 — Брокен Спур. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [Бортников и др., 2004, 2007].

поле 9° с.ш. ВТП гомогенизировались при температурах от 320 до 376°C. Гомогенизация флюидных включений в ангидриде из построек на гидротермальном поле 21° с.ш. ВТП происходила в более широком диапазоне температур: от 142 до 380°C. Солёность флюидов в гидротермальных системах 9° с.ш. и 21° с.ш. ВТП изменялась соответственно от 4.0 до 12.6 мас. % NaCl-экв. и в подавляющем большинстве случаев оставалась постоянной 6—6.5 мас. % NaCl-экв., хотя иногда она резко менялась, снижаясь до 2.3 и повышаясь до 9.7 мас. % NaCl-экв. (см. рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования флюидных включений в минералах из сульфидных построек позволили выяснить особенности физико-химических условий гидротермальных рудообразующих систем «черных курильщиков», связанных с мантийными ультраосновными породами. Установлено, что изученные гидротермальные системы «черных курильщиков», ассоциирующих с гипербазитами на Срединно-Атлантическом хребте, заметно отличаются друг от друга температурами минералоотложения и солёностью флюидов. Выявлены также их отличия от гидротермальных систем, связанных с базальтами, функционирующих как в низкоспрединговых (САХ), так и в высокоспрединговых (ВТП) срединно-океанических хребтах.

Для гидротермальных полей Ашадзе и Логачев было установлено, что температуры и солёность растворов во включениях в минералах изменяются шире, чем эти же характеристики, измеренные непосредственно для флюидов, изливающихся из жерл тех же построек на дно океана. Исследование флюидных включений показало, что сульфидные постройки Ашадзе и Логачева образовывались в результате действия как высокотемпературных (до 355°C), так и низкотемпературных (минимум 170°C) растворов. Солёность флюида во включениях в два раза выше солёности морской воды. Содержание Cl во флюиде, изливающимся из жерла постройки Лонг Чимни, равное 620 ммоль/кг [Fouquet et al., 2008], также выше значений хлора в морской воде (540 ммоль/кг), но эта разница меньше.

Солёность флюида «черных курильщиков», как показали прямые измерения, изменяется от 0.2 до 7.3 [Von Damm, 1995] или от 1.6 до ~ 26 мас. % NaCl-экв., как это оценено при изучении флюидных включений в минералах [Бортников и др., 2004]. Еще большие вариации солёности выявлены у флюидов, захваченных минералами в измененных основных породах Срединно-Атлантического хребта. Флюиды

идные включения с высококонцентрированным флюидом (до 40—60 мас. % NaCl-экв.) были обнаружены в минералах из измененных пород САХ [Kelly, Delaney, 1987; Vanko, 1988; Симонов и др., 1999]. Это привело к выводу о том, что в гидротермальных системах, ассоциированных с основными породами, происходит сложная эволюция флюидного режима, предполагающая отделение магматогенных флюидов, обогащенных CO_2 , и вовлечение в них морской воды на поздних стадиях становления массивов. По данным [Kelley, Delaney, 1987], флюидные включения в минералах из перекристаллизованных габброидов САХ содержат высокоплотные, богатые NaCl (до 50 мас. % NaCl-экв.) рассолы, температура гомогенизации которых составляет $> 700^\circ\text{C}$. Очевидно, что эти находки являются прямым подтверждением участия высокотемпературного водно-солевого флюида в системе океанические плагиограниты—габбро [Аранович и др., 2010].

Большинство исследователей считает, что в современных субмаринных гидротермальных системах циркулирует флюид, образовавшийся в результате нагревания и изменения морской воды при взаимодействии ее с породами океанической литосферы [Von Damm, 1995; и др.]. Возникает вопрос, каким образом морская вода с соленостью 3.5 мас. % преобразовывалась во флюид, соленость которого выше в 1.6—10 раз. В качестве возможных механизмов этого явления были предложены: гидратация пород океанской коры, кристаллизация минералов, содержащих хлор, или фазовая до- или сверхкритическая сепарация нагретой морской воды на малоплотную фазу и рассол [Kelly, Delaney, 1987; Vanko, 1988; Von Damm, 1995; Бортников и др., 2004; Vanko et al., 2004]. Фазовая сепарация флюида и последующая сегрегация газовой и жидкой фаз рассматриваются как наиболее эффективные механизмы, контролирующие химический состав флюида в субмаринных гидротермальных системах [Von Damm, 1995]. Доказательства того, что фазовая сепарация действительно происходит, были собраны при непосредственном отборе малоплотной фазы и рассолов, изливающихся из построек. Обнаружение существенно газовых и жидких флюидных включений в минералах также подтверждает это явление. Температура и давление, при которых изливаются флюиды, в этих случаях близки к критической точке или двухфазовой кривой пар—жидкость для флюида с соленостью морской воды в системе NaCl— H_2O . Параметры флюида, из которого отлагаются минералы сульфидных построек на рассмотренных гидротермальных полях, далеки от двухфазовой кривой. Однако фазовая сепарация флюида представляется единственным механизмом, приведшим к вариациям его солености. Это подтверждается периодическим испусканием газовых пузырей из жерл сульфидной постройки, наблюдавшимся с помощью видеокамер, установленных на аппарате «Victor 6000» [Fouquet et al., 2008].

Свидетельством того, что морская вода вовлекается в образование пород слоя 3D, может служить их обогащение радиогенным изотопом Sr [Шатагин и др., 2006]. Исследование изотопов Nd и Sr в ультраосновных породах, габброидах, плагиогранитах и в минералах из них и соотношения изотопов He во флюидных включениях в минералах выявило смешение в различной степени истощенной мантии и корового компонента (морской воды) при образовании пород океанической коры [Савельева и др., 2008]. Морская вода проникает в Срединно-Атлантическом хребте до глубин примерно 8 км от поверхности дна, нагревается до 850°C и участвует в образовании океанических плагиогранитов [Силантьев и др., 2010]. Полный цикл гидротермальной циркуляции, во многом определяющей совмещение непунических и плутонических процессов, можно представить в виде следующей схемы.

Образование гидротермального флюида за счет взаимодействия морской воды с вмещающими породами. На этом этапе происходит увеличение температуры и концентрации солей во флюиде вследствие реакций гидратации.

Взаимодействие высокотемпературного гидротермального флюида с неостывшим (или испытывавшим вторичный разогрев) габброидным веществом — образование океанских плагиогранитов. Прямым доказательством данного процесса являются высокотемпературные флюидные включения в кварце гранитоидов САХ [Симонов и др., 1999].

Быстрый транспорт гидротермального флюида к поверхности океанического дна и его смешение с морской водой в зоне разгрузки, сопровождающееся формированием рудных построек.

В результате этих процессов может происходить кристаллизация минералов, содержащих воду, что приводит также к закупорке системы трещин жилами и к переходу от гидростатического к литостатическому давлению в системе. Проникающая в глубокие части литосферы преобразованная в высокотемпературный флюид морская вода претерпевает при последующем подъеме фазовую сепарацию на газовую фазу и рассол. Новые порции морской воды, просачивающиеся вглубь по вновь открывшимся трещинам, смешиваются с рассолами, что приводит к увеличению солености новообразованного флюида не менее чем в два раза.

Полученные данные позволили обосновать явление фазовой сепарации флюида в самой глубоководной субмаринной гидротермальной системе Ашадзе и значительно расширили наши представления о химизме и температуре флюидов, образующих сульфидные залежи на полях Ашадзе и Логачев, по сравнению с тем, что было установлено при прямых измерениях во время рейса НИС «Pourquoi Pas?».

Значительные изменения солёности минералообразующего флюида могут быть обусловлены фазовой сепарацией флюида, образовавшегося при серпентинизации ультраосновных и основных пород при их взаимодействии с нагретой морской водой, в результате чего содержание хлора в нем было повышено по сравнению с исходной концентрацией. Этот процесс приводил к возникновению рассолов, солёность которых могла достигать примерно 30 мас. %. Последующее смешение их с морской водой приводило к обнаруженным вариациям солёности флюида.

В целом представляется, что эволюция флюидного режима в гидротермальных системах, связанных с комплексом ультраосновных-основных пород, была более сложной, чем в системах, ассоциированных с базальтами. Как показали исследования флюидных включений в минералах из интрузивных пород, в этих системах обнаруживаются свидетельства участия магматогенного от низко- до высококонцентрированного водно-метан-бикарбонатного флюида [Kelley et al., 1998], который на последующих стадиях мог смешиваться с флюидом, образовавшимся при взаимодействии пород с морской водой. Выявленные особенности флюидного режима в гидротермальных системах, связанных с перидотитами в Срединно-Атлантическом хребте, могут отражать различия в геологических и магматических процессах, происходящих в разных сегментах этого хребта.

Исследования проведены при поддержке программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы Мирового океана» и Федерального агентства Роснаука (Госконтракт № 02.515.11.5083), а также при поддержке интеграционного проекта СО РАН и УрО РАН № 98.

ЛИТЕРАТУРА

Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Серебряков Н.С., Шарков Е.В. Условия образования плагиогранитов впадины Маркова, Срединно-Атлантический хребет, $5^{\circ}52' - 6^{\circ}02'$ с.ш. // Докл. РАН, 2010, т. 434, № 3, с. 372—377.

Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». М., Научный мир, 2002, 304 с.

Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Викентьев И.В., Гурвич Е.Г., Сагалевич А.М. Новый тип современной минералообразующей системы: «черные курильщики» гидротермального поля $14^{\circ}45'$ с.ш., Срединно-Атлантический хребет // Геология рудных месторождений, 1997, т. 39, № 2, с. 68—90.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977 (8), с. 16—27.

Борисенко А.С., Боровиков А.А., Житова Л.М., Павлова Г.Г. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1308—1325.

Боровиков А.А., Лапухов А.С., Борисенко А.С., Сереткин Ю.В. Физико-химические условия формирования эпитепидального Асачинского Au-Ag месторождения (Южная Камчатка) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (8), с. 897—909.

Бортников Н.С., Симонов В.А., Богданов Ю.А. Флюидные включения в минералах из современных сульфидных построек: физико-химические условия минералообразования и эволюция флюида // Геология рудных месторождений, 2004, т. 46, № 1, с. 74—87.

Бортников Н.С., Сагалевич А.М., Симонов В.А., Икорский С.В., Тереня Е.О., Каменский И.Л., Аведисян А.А., Ставрова О.О., Драничникова В.В. Эволюция минералообразующих флюидов в современных гидротермальных системах на Восточно-Тихоокеанском поднятии $9^{\circ} - 10^{\circ}$ с.ш. и 21° с.ш. (по данным изучения флюидных включений в минералах) // Докл. РАН, 2007, т. 413, № 5, с. 671—675.

Геологические исследования в Центральной Атлантике / Под ред. В.Н. Шарапова, В.А. Симонова. Новосибирск, ОИГТМ СО АН СССР, 1991, 192 с.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 271 с.

Краснова Е.А., Силантьев С.А., Костицын Ю.А., Каннат М. Rb-Sr и Sm-Nd изотопные системы в плутонических комплексах гидротермальных полей Ашадзе и Логачев // VI Russian Ridge Workshop. St. Petersburg, VNIPOkeangeologia, 2009, p. 20—22.

Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 1973, 327 с.

Наумов В.Б. Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М., Недра, 1982, с. 85—94.

Наумов В.Б., Миронова О.Ф., Прокофьев В.Ю., Леин А.Ю. Исследование флюидных включений в минералах современных подводных гидротермальных построек // Геохимия, 1991, № 1, с. 39—45.

Савельева Г.Н., Бортников Н.С., Баянова Т.Б., Икорский С.В., Каменский И.Л. Изотопные Sm-Nd, Rb-Sr системы, захваченный He и углеводородные газы как маркеры источников расплава и флюидного режима при формировании океанической коры Срединно-Атлантического хребта в районе 5—6° с.ш. // *Геохимия*, 2008, № 8, с. 803—817.

Силантьев С.А., Аранович Л.Я., Бортников Н.С. Океанические плагиограниты: результат взаимодействия магматической и гидротермальной систем в медленно-спрединговых срединно-океанических хребтах // *Петрология*, 2010, т. 18, № 4, с. 387—401.

Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.

Симонов В.А., Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Муравьев К.Г. Физико-химические условия современных гидротермальных рудообразующих систем (черные курильщики) в Центральной Атлантике // *Геология морей и океанов*. Т. 2. М., СО РАН, 1997, с. 182.

Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А. Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999, 224 с.

Симонов В.А., Богданов Ю.А., Викентьев И.В. Физико-химические параметры гидротермальных рудообразующих систем поля Рейнбоу (Срединно-Атлантический хребет) // *Металлогения древних и современных океанов-2000. Открытие, оценка, освоение месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 2000, с. 110—114.

Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Летунов С.П., Прокофьев В.Ю. Флюидный режим процесса рудообразования Балеической золоторудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51 (10), с. 1413—1422.

Шатагин К.Н., Шарков Е.В., Чернышев И.В., Бортников Н.С., Красивская И.С., Гольцман Ю.В., Баирова Е.Д., Чистяков А.В. Sr-Nd изотопная неоднородность базальтов полигона Сьерра Леоне, Срединно-Атлантический хребет, 5°—7° с.ш. // *Докл. РАН*, 2006, т. 410, № 7, с. 392—396.

Batuev V.N., Krotov A.G., Markov V.E., Cherkashev G.A., Krasnov S.G., Lisitsin Ye.D. Massive sulphide deposits discovered and sampled at 14°45'N, Mid-Atlantic Ridge // *BRIDGE Newsletter*, 1994, v. 6, p. 6—10.

Beltenev V.E., Nescheretov A.V., Shilov V.V., Ivanov V., Shagin A., Stepanova I., Cherkashev G., Batuev V., Samorarov M., Rozhdestvenskaya I., Andreeva I., Fedorov I., Davydov L., Romanova A., Rumyantsev A., Zaharov V., Luneva N., Artemeva O. New discoveries at 12°58'N, 44°52'W, MAR: Professor Logatchev-22 cruise, initial results // *InterRidge News*, 2003, v. 12, № 1, p. 13—14.

Bodnar R.J. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 683—684.

Borovski C., Asendorf V., Burk D., Collasius A.J., Elder R., Fabian M., Forte P., Fuhrmann R., Hansen S., Jost C.L., Keir R., Kevis-Stirling J., Kevis-Stirling N., Perner M., Petersen J.M., Roy H., Schaner R., Schmale O., Schmidt K., Scott D., Waters R., Wefers P., Wetzel S. New coordinates for the hydrothermal structures in the Logatchev vent field at 14°45'N on the Mid-Atlantic Ridge // *InterRidge News*, 2007, v. 16, p. 13—14.

Bortnikov N.S., Simonov V.A. Physical-Chemical parameters of ore-forming processes on the hydrothermal field Ashadze-1 (Central Atlantic) // *VI Russian Ridge Workshop*. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2009, p. 9—10.

Bortnikov N.S., Simonov V.A., Shilova T.V., Fouquet Y. Physico-chemical parameters of the ore-forming systems at the Logatchev-1 hydrothermal field (data on fluid inclusions) // *Minerals of the Ocean-5, Deep-Sea Minerals and Mining-2. Joint International Conference*. St. Petersburg, VNIIOceangeologia, 2010, p. 50—51.

Brett R., Evans H.T., Gibson E.K., Hedenquist J.W., Wandless M.-V., Sommer M.A. Mineralogical studies of sulfide samples and volatile concentrations of basalt glasses from the southern Juan de Fuca ridge // *J. Geophys. Res.*, 1987, v. B 92, № 11, p. 373—379.

Cherkashov G.A., Ashadze A.M., Gerbruk A.V. New fields with manifestation of hydrothermal activity in the Logatchev area (14°N, Mid-Atlantic Ridge) // *InterRidge News*, 2000, v. 9, p. 26—27.

Fouquet Y., Charlou J.-L., Ondreas H., Radford-Kroery J., Donval J.P., Douville E., Apprioual R., Cambon P., Pelle H., Landure J.Y., Normand A., Ponsevera E., German C., Parson L., Barriga F., Costa I., Relvas J., Ribeiro A. Discovery and first submersible investigations on the Rainbow Hydrothermal Field on the MAR (36°14' N) // *EOS Amer. Geophys. Union Transactions*, 1997, v. 78, № 46, p. F832.

Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J.L., Ondreas H., Biror D., Cannat M., Bortnikov N., Silant'ev S., Sudarikov S., Carbon-Bonavita M.A., Desbruyeres D., Querellou J., Hourdez S., Gebruk A., So-

kolova T., Hoise E., Mercier E., Kohn C., Donval J.P., Eroubleau J., Normana A., Stephan M., Briand P., Crozon J., Fernagu P., Buffer E. 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.

Hannington M.D., Scott S.D. Mineralogy and geochemistry of a hydrothermal silica-sulfide-sulfate spire in the caldera of Axial Seamount, Juan de Fuca Ridge // *Canad. Miner.*, 1988, v. 26, № 3, p. 603—625.

Kelley D.S., Delaney J.R. Two-phase separation and fracturing in mid-ocean ridge gabbros at temperatures greater than 700°C // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1987, v. 83, p. 53—56.

Kelley D.S., Vanko D.A., Gu C. Fluid evolution in oceanic crustal layer 2: fluid inclusion evidence from the sheeted dike complex, Hole 504B, Costa Rica rift // *Proc. ODP, Sci. Results: College Station, TX (Ocean Drilling Program)*, 1995, v. 137/140, p. 191—198.

Kelley D.S., Lilley M.D., Lupton J.E., Olson E.J. Enriched H₂, CH₄, and He concentrations in hydrothermal plumes associated with the 1996 Gorda Ridge eruptive event // *Deep-Sea Research II*, 1998, v. 45, p. 2665—2682.

Kusakabe M., Chiba H., Ohmoto H. Stable isotopes and fluid inclusion study of anhydrite from the East Pacific Rise at 21° N // *Geochem. J.*, 1982, v. 16, p. 89-95.

Le Bel L., Oudin E. Fluid inclusion studies of deep-sea hydrothermal sulphide deposits on the East Pacific Rise near 21° N // *Chem. Geol.*, 1982, v. 37, № 1—2, p. 129—136.

Peter J.M., Scott S.D. Mineralogy, composition, and fluid-inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guayamas Basin, Gulf of California // *Canad. Miner.*, 1988, v. 26, № 3, p. 567—587.

Petersen S., Herzig P.M., Hannington M.D. Fluid inclusion studies as a guide to the temperature regime within the TAG hydrothermal mound, 26°N, Mid-Atlantic Ridge // *Proc. ODP, Sci. Results: College Station TX (Ocean Drilling Program)*, 1998, v. 158, p. 163—178.

Petersen S., Augustin N., Cherkashov G., Fischer S., Franz L., Han X., Klein F., Maggiulli M., Ockert C., Perner M., Peters M., Rahders E., Rudzitis E., Smith D., Stepanova T., Storm T., Strauss H., Zhou N. Shallow-drilling of the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal vent field at 14°45'N on the Mid-Atlantic Ridge using a new lander-type sea-floor drill // *InterRidge News*, 2007, v. 16, p. 9—13.

Roedder E. Fluid Inclusions. *Miner. Soc. Amer.*, 1984, 644 p.

Tivey M.K., Mills R.A., Teagle D.A.H. Temperature and salinity of fluid inclusions in anhydrite as indicators of seawater entrainment and heating in the TAG active mound // *Proc. ODP, Sci. Results: College Station, TX (Ocean Drilling Program)*, 1998, v. 158, p. 179—190.

Vanko D.A. Temperature, pressure, and composition of hydrothermal fluids, with their bearing on the magnitude of tectonic uplift at mid-ocean ridges, inferred from fluid inclusions in ocean layer 3 rocks // *J. Geophys. Res.*, 1988, v. 93, p. 4595—4611.

Vanko D.A., Bach W., Roberts S., Yearts C.J., Scott S.D. Fluid inclusion evidence for subsurface phase separation and variable fluid mixing regimes beneath the deep-sea PACMANUS hydrothermal field, Manus Basin back arc rift, Papua New Guinea // *J. Geophys. Res.*, 2004, v. 109, № B032201, p. 1—14.

Von Damm K.L. Controls on the chemistry and temporal variability of seafloor hydrothermal fluids // *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geochemical Interactions. Geophysical Monograph*, 1995, v. 91, p. 222—247.

*Поступила в редакцию
17 февраля 2011 г.*