



Atlantic Ocean Hydrothermal Fields

Гидротермальное оруденение Атлантического океана

Laboratory of Geomorphology and Ocean Floor Tectonics
of [Geological Institute, Russian Academy of Sciences.](#)



[Russian](#)



[English](#)

Для русскоговорящих исследователей

25 лет назад в Галапагосском рифте американскими исследователями было открыто первое гидротермальное поле на дне Мирового океана (<http://www.divediscover.who.edu/>). Подобные объекты известны сейчас во всех океанах и в ряде окраинных морей.

Вместе с тем, все открытия имели случайный характер и примером может быть исследования на угловом поднятии разлома Атлантик (<http://www.nsf.gov/od/lpa/news/>, Ridge Events, Newsletter of the US RIDGE Initiative Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments, Vol. 11, № 2, June 2001, <http://earthguide.ucsd.edu/mar/>).

Ниже Вы можете прочитать наши статьи (тексты и иллюстрации по отношению к оригиналам несколько изменены), которые были направлены на разработку прогноза положения "черных курильщиков" и рудной минерализации в Атлантическом океане.

Неточности, которые мы нашли в некоторых ранее опубликованных рисунках оригиналов статей - не исправлялись.

Приносим за них извенения читателям.

If you can't read Russian

25 years ago in Galapagos rift american researchers discovered first oceanic bottom hydrothermal field (<http://www.divediscover.who.edu/>). Today we know these phenomens in all oceans and in any marginal seas. Unfortunatally all discoveries was случайный характер. As exampele - divings on the Atlantis FZ High Inside Corner (<http://www.nsf.gov/od/lpa/news/>, Newsletter of the US RIDGE Initiative, Ridge Events, <http://earthguide.ucsd.edu/mar/>, Ridge Inter-Disciplinary Global Experiments, V. 11, # 2, 2001).

Мы помещаем наши статьи (тексты и иллюстрации несколько изменены), которые были направлены на разработку прогноза положения "черных курильщиков" и рудной минерализации в Атлантическом океане.

Опечатки, которые мы нашли в оригиналах статей - не снимались. Приносим за них извенения читателям.



Положение активных гидротермальных полей
Active hydrothrmal fields location

“The Discovery of Hydrothermal Vents - 25th Anniversary CD-ROM”

©2002 Woods Hole Oceanographic Institution



Russian

1998 Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте

2001 Гидротермальная минерализация разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика)

2002 Положение и перспективы открытия гидротермальных полей в Срединно-Атлантическом хребте



English

1998 Mid-Atlantic Ridge Hydrothermal Fields Tectonic Position

2001 Sierra Leone Fracture Zone Hydrothermal Mineralization (Central Atlantic Ocean)

2002 Mid-Atlantic Ridge Hydrothermal Fields: Setting and Further Discoveries Prospects

Гидротермальное оруденение Атлантического океана

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

1998 год

Литология и полезные ископаемые. 1998. № 4. С. 436-439

Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте

А.О. Мазарович, С.Ю. Соколов

АННОТАЦИЯ

Положение гидротермальных полей в Срединно-Атлантическом хребте было сопоставлено с гравитационными аномалиями и положением эпицентров землетрясений (1937-1997). Установлено, что гидротермальные поля тяготеют к относительно стабильным (асейсмичным) частям рифтовых зон, которые наиболее благоприятны для устойчивой циркуляции растворов в условиях спрединга с низкими скоростями. Такие области располагаются в областях разрывов ("discontinuity").

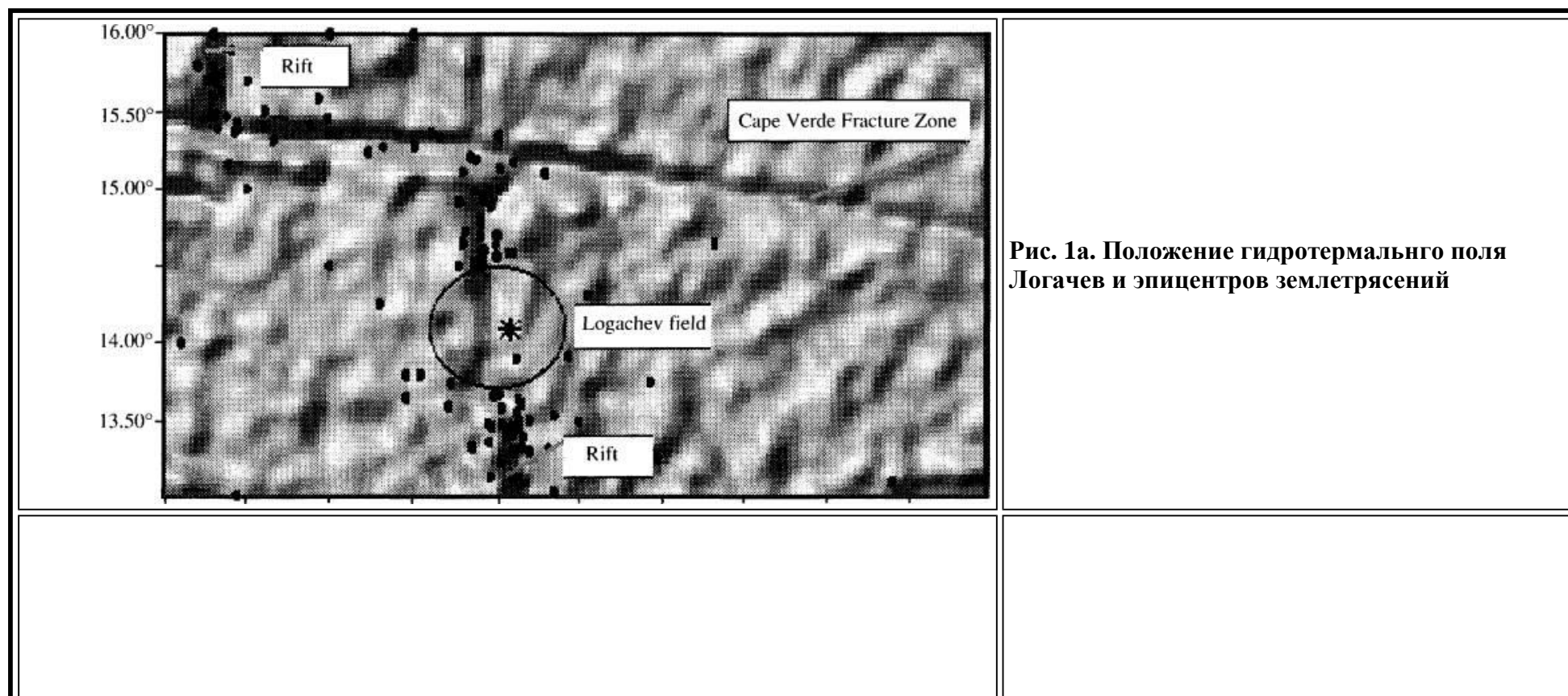
В Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов Геологического института РАН проводится работа над созданием цифровой тектонической карты Центральной Атлантики. Она сопровождается созданием базы данных и анализом самого разнообразного материала. В ходе этих исследований у авторов появились наблюдения, которые, возможно, представят интерес для специалистов в области океанских гидротермальных систем.

Высокотемпературные гидротермальные источники были открыты в конце семидесятых годов. В настоящий момент в Мировом океане изучено с разной степенью детальности свыше 100 активных и реликтовых полей [Rona, Scott, 1993].

Региональные исследования [Рона, 1986, Rona, Scott, 1993 и др.] показали, что большинство гидротермальных рудопроявлений расположено в пределах неовулканических зон рифтов (ТАГ, Снейк Пит и Брокен Спур) и тяготеют к вулканическим сводам в их пределах. Отмечено, что активные гидротермальные источники чаще всего размещаются в зонах тектонических нарушений. Известна ситуация, когда активное гидротермальное поле ("Логачев") располагается на поверхности краевого уступа рифтовой долины, сложенного серпентинизированными ультраосновными породами [Богданов и др., 1995]. Такое положение плохо вписывается в существующую схему циркуляционных гидротермальных систем спрединговых хребтов.

При составлении карты магматизма Центральной Атлантики появилась идея отразить на ней и положение гидротермальных полей. После того как они были вынесены на карту гравитационных аномалий, составленную по спутниковым данным [Sandwell, Smith,

1997], мы сопоставили полученную картину с положением эпицентров землетрясений (1937-1997) (эта информация была получена из каталога National Earthquake Information Center (USA) по Интернету). Результат этих сопоставлений показал следующее. Недавно открытое в районе $14^{\circ}45'$ с.ш. поле "Логачев" [Богданов и др., 1995] располагается в сегменте САХ между разломами Зеленого Мыса и Марафон. Анализ альтиметрической карты (рис.1а) совмещенный с эпицентрами землетрясений показал, что именно здесь находится район отсутствия сейсмической активности. Сюда же трассируется зона протяженных гравитационных аномалий (в рельефе - желоб), которые прослеживаются на многие сотни км к востоку и западу от оси хребта. Отметим, что с этим же линеamentом связано три (из пяти) известных глубокофокусных землетрясений в осевой части Атлантического океана) с глубинами эпицентров в 60, 60 и 51 км и с магнитудами 6, 7.3 и 4.7 соответственно.



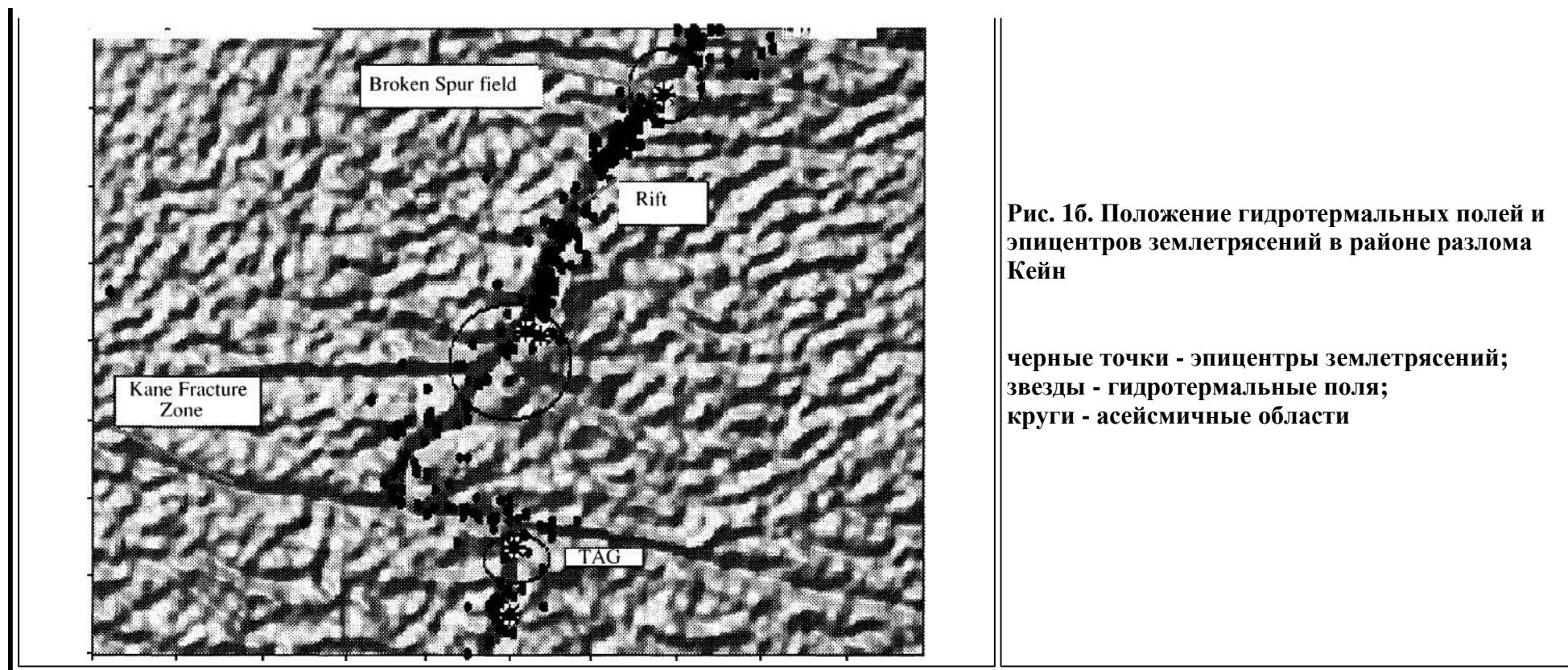


Рис. 16. Положение гидротермальных полей и эпицентров землетрясений в районе разлома Кейн

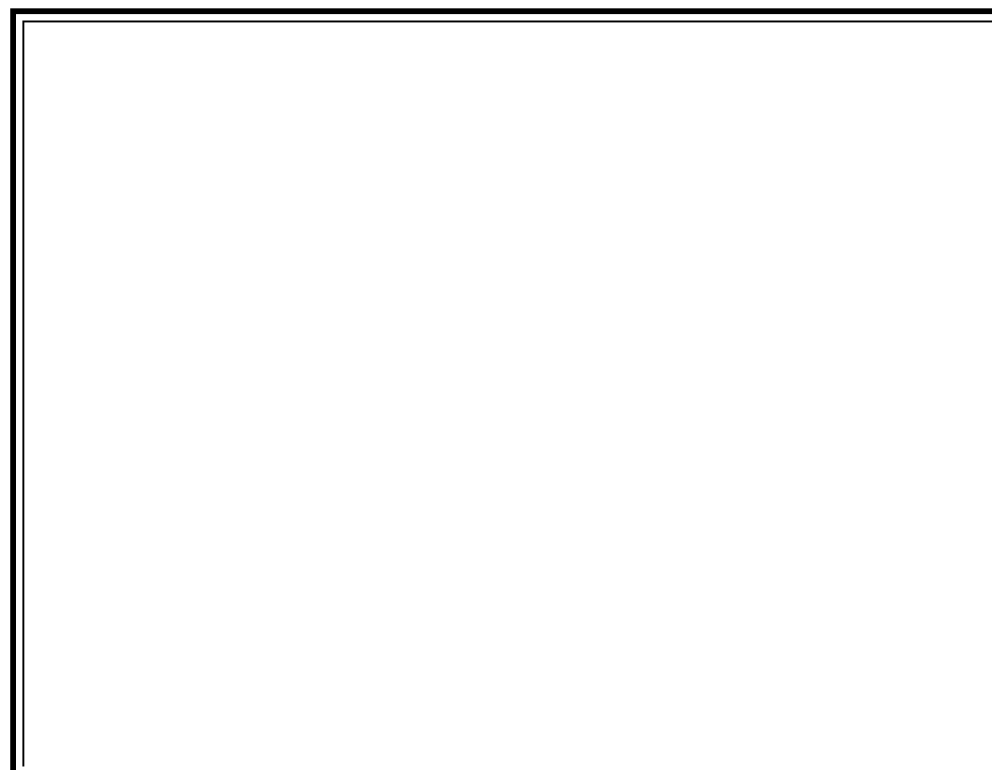
черные точки - эпицентры землетрясений;
звезды - гидротермальные поля;
круги - асейсмичные области

Гидротермальные поля ТАГ, Снейк Пит и Брокен Спур (см. [рис.16](#)) также располагаются или в асейсмичных зонах или вблизи них. К районам их расположения подходят протяженные депрессии дна. Глубокофокусные землетрясения в районе разлома Кейн не установлены. В пределах поля ТАГ гидротермальные постройки образовались либо на поверхности интенсивно раздробленного фундамента, либо в пределах осыпи, сложенной обломками вулканитов [Лисицин и др., 1990]. Известные гидротермальные плюмы [Лукашин и др., 1997] также попадают в асейсмичную зону.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что гидротермальные поля тяготеют к относительно стабильным частям рифтовых зон, которые по всей видимости наиболее благоприятны для устойчивой циркуляции гидротерм в условиях спрединга с низкими скоростями. Такие области располагаются в областях разрывов ("discontinuity").

Общая схема образования гидротермальных растворов хорошо известна и сводится к следующему. В пределах рифтов океанская вода проникает в кору по системе открытых трещин (гьяров) и в результате ее взаимодействия с породами океанской коры и магматическими очагами, имеющими высокую температуру, нагревается до близкритических температур (более 400°C). После этого, обогащенный разными элементами, гидротермальный раствор поднимается к поверхности, где в районе его разгрузки установлены "черные курильщики" и другие рудообразующие полиметаллические рудопроявления [Лисицин и др., 1990, Рона, 1986, Karson, Rona, 1990 и др.]. Установленное нами тектоническое положение гидротермальных полей может внести в существующие модели ряд изменений.

Открытые трещины в ее пределах ориентированы субпараллельно простиранию рифтовой долины. Логично предположить, что миграция растворов будет осуществляться не поперек рифта, как это принято, а в направлениях с наилучшими условиями проницаемости, т.е. вдоль простирания рифта (аналогично трещинным коллекторам в нефтяных резервуарах) ([рис.2](#))



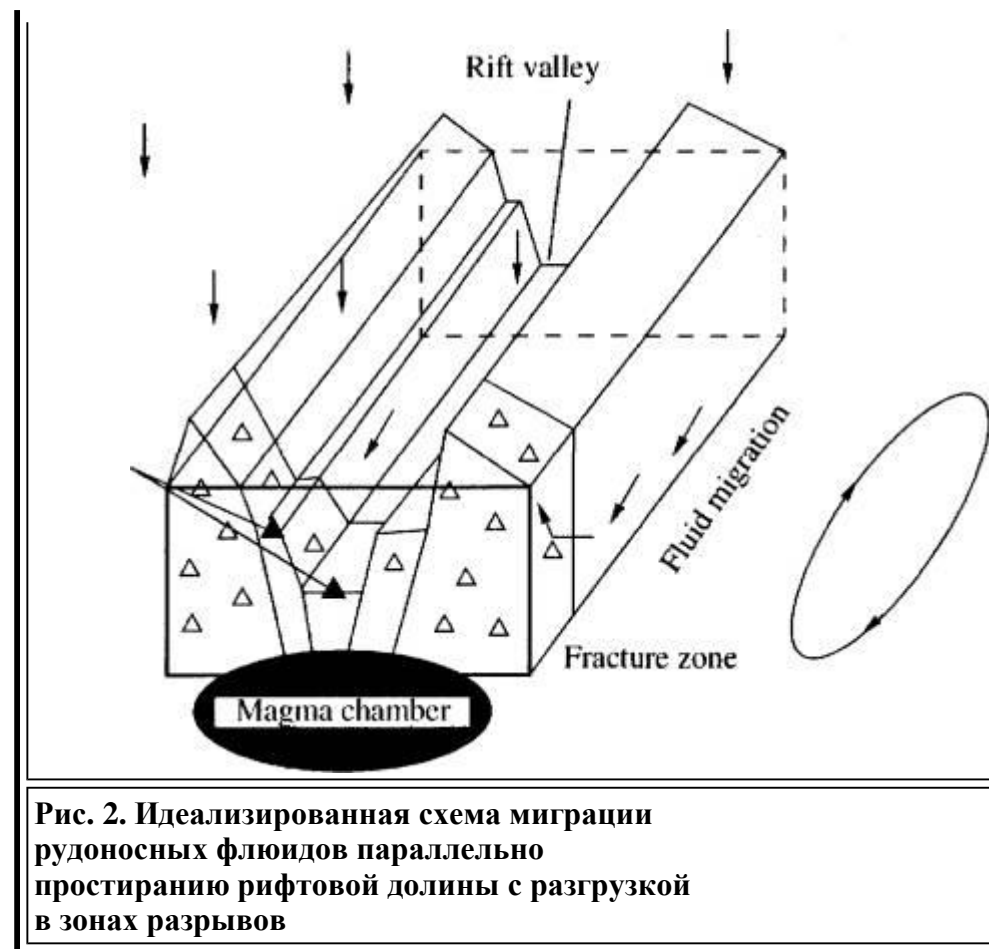


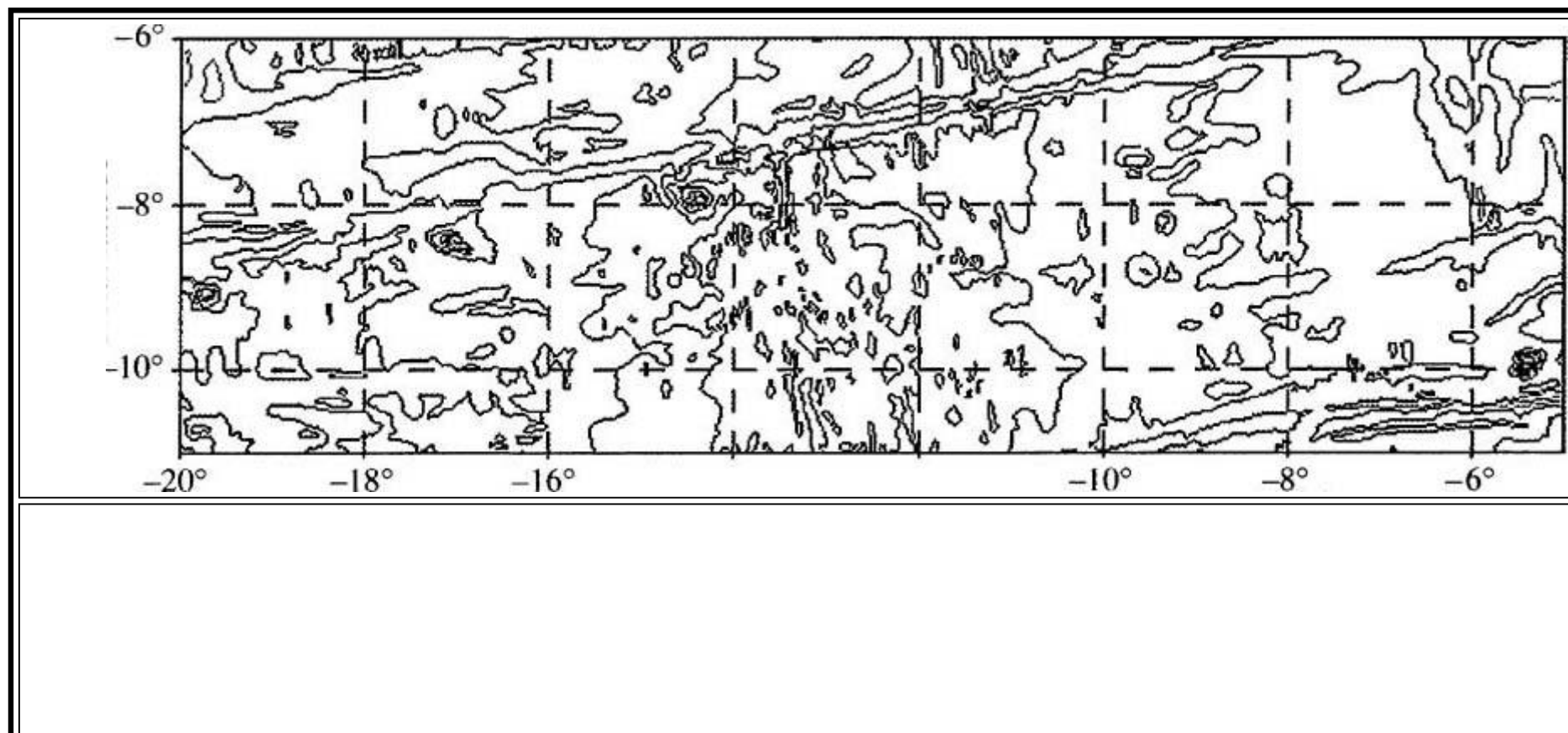
Рис. 2. Идеализированная схема миграции рудоносных флюидов параллельно простиранию рифтовой долины с разгрузкой в зонах разрывов

Возможно, что это движение происходит в сторону наиболее приподнятых частей рифтовой долины. Местами же очага разгрузки в этом случае должны находиться в наиболее стабильных частях, в которых созданы условия для долговременной (до десятков тысяч лет) устойчивой циркуляции гидротермальных растворов. Такие восходящие "колонны" и располагаются в выявленных нами областях с отсутствием или пониженной сейсмичностью. Разрывы ("discontinuity"), видимо представляют собой районы с повышенным количеством брекчий, или, иными словами, повышенной открытой пористостью и проницаемостью.

Заключение

Таким образом, основная циркуляция океанической воды и превращение ее в рудообразующие растворы происходит вдоль простираения рифтовых зон с последующей разгрузкой в относительно стабильных областях..

Анализ расположения эпицентров в Срединно-Атлантическом хребте между 30° с.ш. и 15° ю.ш. показывает, что в указанных пределах имеется ряд районов (южнее разлома Вознесения и ряд других) с пониженной сейсмичностью или ее отсутствием ([рис.3](#)), которые совпадают с областями разрывов. Можно предполагать, что это наиболее перспективные районы для открытия гидротермальных полей.



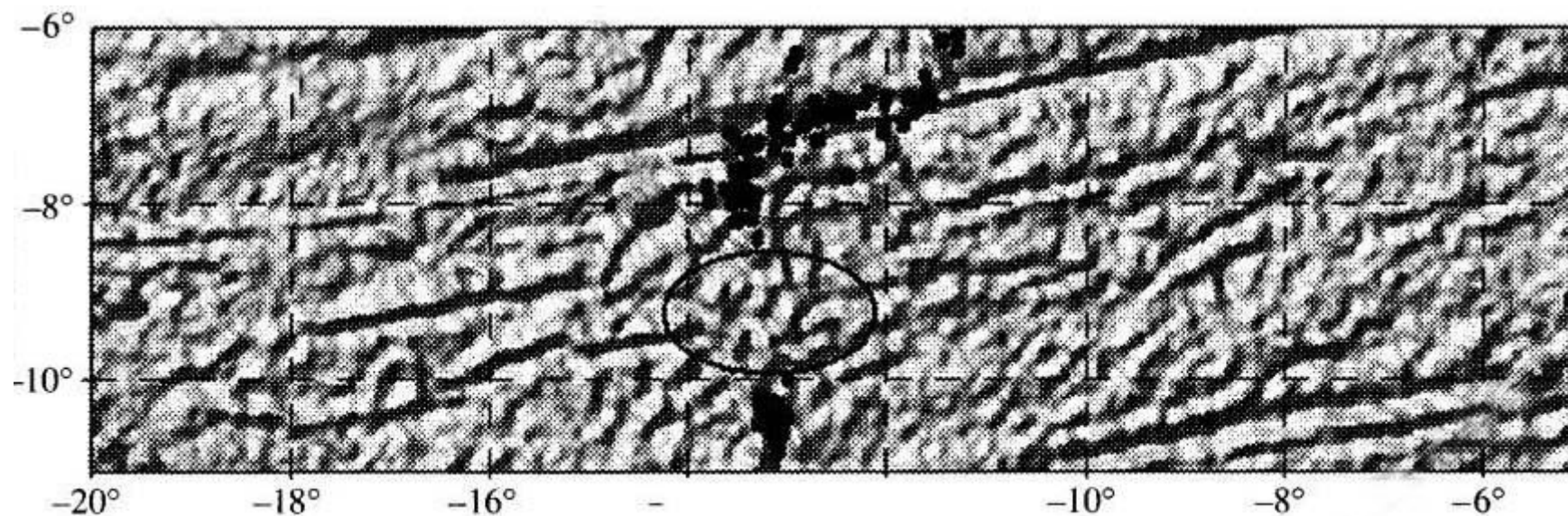


Рис. 3. Фрагмент батиметрической карты ГЕБКО (вверху) и карта гравитационных аномалий по данным спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 1997) (внизу) на район САР в координатах 11° - 6° ю.ш. и 20° - 5° з.д.

Черные точки - эпицентры землетрясений; эллипс - возможный район обнаружения гидротермального поля

Литература

- Богданов Ю.А., Сагалевиц А.М., Ашадзе А.М., Черняев Е.С., Гурвич Е.Г., Лукашин В.Н., Иванов Г.В., Пересыпкин В.И. Гидротермальное поле 14°45' с.ш. Срединно-Атлантического хребта // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 3. С. 353-357.
- Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г. Гидротермальные образования рифтовых зон океана. М.: Наука, 1990. 256 с.
- Лукашин В.Н., Лисицын А.П., Иванов Г.В., Кравцов В.А., Русаков В.Ю. Исследование гидротермальных плюмов над рифтовой зоной Срединно-Атлантического хребта в районе 29° с.ш. //Океанология. 1997. Т.37. № 5. С.770-779.
- Рона П. Гидротермальная минерализация областей спрединга в океане. М.: Мир, 1986. 160 с.

Karson J.A., Rona P.A. Block-tilting, transfer faults, and structural control of magmatic and hydrothermal processes in the TAG area, Mid-Atlantic Ridge 26°N. // Geol. Soc. Am.Bull. 1990. V.102. # . P. 1635-1345.

Rona P.A., Scott S.D. A special Issue on Sea-Floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives. Preface. // Economic Geology. 1993. V. 88. # 8. P.1935-1976.

Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry.//J. geophys. Res. 1997. V. 102. # B5. P. 10039-10054.

[к началу](#)

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

2001год

Литология и полезные ископаемые. 2001. № 5. С. 1 - 8

Гидротермальная минерализация разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика)

А.О.Мазарович , В.А.Симонов*, А.А.Пейве, С.В. Ковязин*, Г.А. Третьяков*, Ю.Н.Разницин, Г.Н.Савельева, С.Г.Сколотнев, С.Ю.Соколов, Н.Н.Турко

Геологический институт Российской академии наук, 109017 Москва Пыжевский пер., 7

*Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО Российской академии наук, 630090 Новосибирск 90. пр.

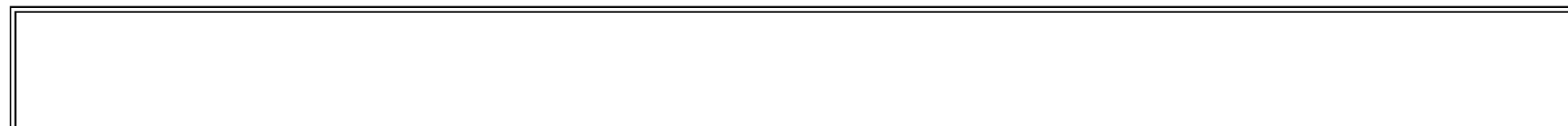
Академика Коптюга, 3.

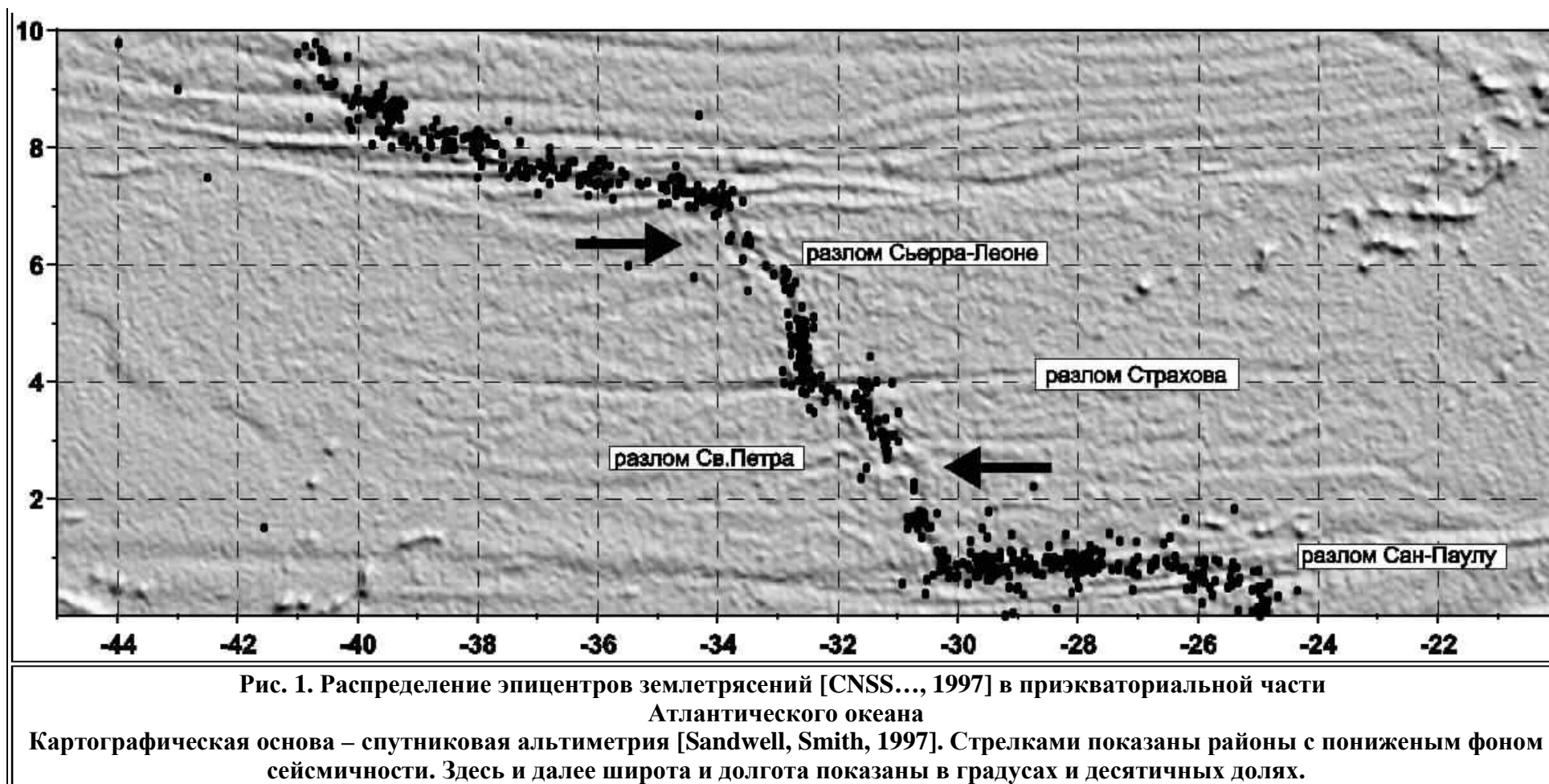
АННОТАЦИЯ

В 2000 году, на основании разработки 1998 г., в 22-ом рейсе НИС «Академик Николай Страхов», была изучена область разлома Сьерра-Леоне. Этот район предполагался как перспективный для открытия нового гидротермального поля. Анализ расплавных включений показал, что магматические комплексы формировались из высокотемпературных (1210 - 1255°C) низкокалийных расплавов типа N-MORB, флюидных включений - под влиянием активно действующей гидротермальной системы с температурами 205 - 226°C. Таким образом, теоретическая модель 1998 г. получила первое подтверждение в 2000 г. в ходе экспедиции

Анализ данных по положению гидротермальных полей, сейсмичности и спутниковой альтиметрии свидетельствует о том, что в срединно-океанических хребтах с невысокой скоростью спрединга гидротермальные поля тяготеют к областям пересечений разрывов (“discontinuity”) и рифтовых зон с пониженным фоном сейсмичности [Мазарович, Соколов, 1998]. Согласно рассмотренной в этой работе модели, предполагается, что миграция флюидов осуществляется вдоль простирания рифта в соответствии с ориентацией трещин. В этом случае места разгрузки рудных компонентов должны находиться в наиболее стабильных частях рифтовых зон, где созданы условия для долговременной (до десятков тысяч лет) устойчивой циркуляции гидротермальных растворов.

Анализ расположения эпицентров землетрясений [CNSS..., 1997] в приэкваториальной Атлантике ([рис. 1](#)) показывает, что здесь есть два региона, в которых землетрясения или не зарегистрированы или их количество существенно меньше чем на соседних участках Срединно-Атлантического хребта (САХ). Первый располагается в области разлома Св. Петра (2°40' с.ш.), второй – разлома Сьерра-Леоне (6° с.ш.). Оба разлома имеют незначительные по протяженности активные части и могут быть отнесены к разрывам (“discontinuity”).





Область разлома Сьерра-Леоне исследовалась нами в 2000 году во время [22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов»](#) [Reyve et al., 2000] совместно с Институтом Морской геологии (Болонья, Италия). В ходе экспедиции с помощью многолучевого эхолота [SIMRAD 12S](#) проводилась [батиметрическая съемка со сплошным покрытием](#) и драгирование, которое позволило обнаружить породы с гидротермальными изменениями и с сульфидной минерализацией.

Геологическое положение гидротермально измененных пород

Рифтовая зона САХ между разломами Страхова (4° с.ш.) и $7^{\circ}10'$ с.ш. разделена на три крупных сегмента. Наиболее южный из которых расположен между разломами Страхова и $5^{\circ}05'$ с.ш. Здесь развита субмеридиональная рифтовая долина прямолинейной в плане формы, которая обрамлена рифтовыми горами, осложненными отдельными субширотными седловинами [Экваториальный..., 1997]. По данным драгировок, здесь обнаружены только измененные в различной степени базальты. Второй сегмент расположен между $5^{\circ}05'$ с.ш. и $6^{\circ}15'$ с.ш. Рифтовая зона имеет общее простирание 320° . Она состоит из трех изолированных впадин сложной конфигурации. Западный борт образован узкими вытянутыми хребтами, которые испытывают разворот с меридионального простирания на 320° в районе $5^{\circ}05'$ с.ш. Третий сегмент представляет собой хорошо выраженную в рельефе рифтовую долину с неовулканическими хребтами. Строение рифта нарушено двумя крупными широтными зонами ($6^{\circ}54'$ с.ш. и Сьерра-Леоне - 6° - $6^{\circ}20'$ с.ш.). Обе, по данным спутниковой альтиметрии [Sandwell, Smith, 1997], представлены в гравитационном поле отчетливыми линейными минимумами. В бортах рифтовой долины наблюдается широкое распространение ультрабазитов и габброидов. Ее дно сложено свежими подушечными базальтами.

Область пересечения разлома Сьерра-Леоне и рифтовой долины имеет очень сложное строение (рис.2).



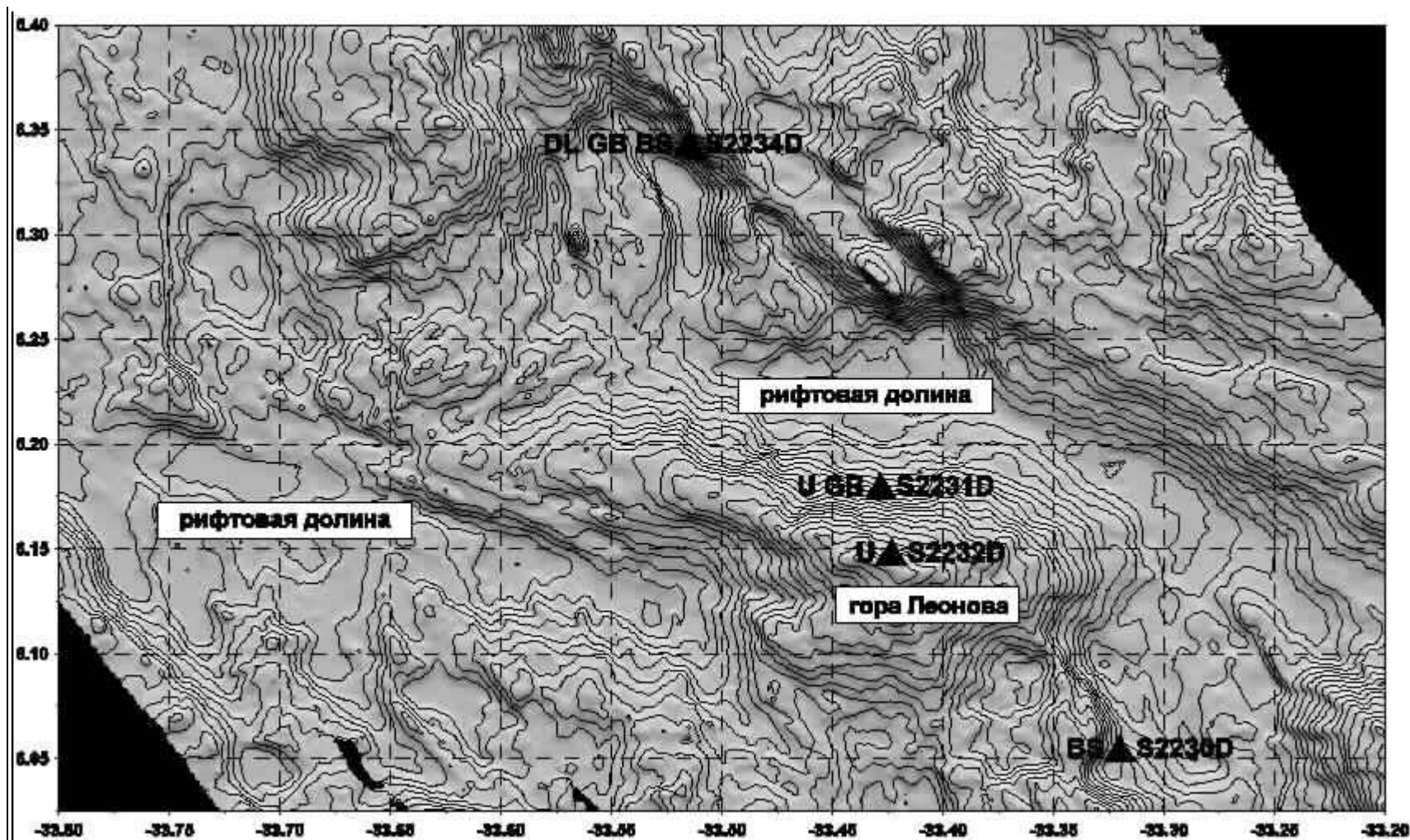


Рис. 2. Рельеф района пересечения рифтовой долины и разлома Сьерра-Леоне (сечение рельефа – 100 м)
Треугольники – положение станций драгирования: справа – номера станций, слева – типы пород (BS – базальт, U – гипербазиты, GB – габбро, DL – долерит)

Рифтовая долина состоит из двух ветвей, разделенных горой с минимальной отметкой 1902 м, которой предлагается присвоить название «гора Леонова» в честь профессора Геологического факультета МГУ Георгия Павловича Леонова (подробнее -

http://atlantic.tv-sign.ru/names/russian/names_r.html). Во время 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в описанном выше районе, как перспективном для обнаружения признаков гидротермальной деятельности, было проведено драгирование (см. [рис. 2](#)) на четырех станциях. Особый интерес представляют породы со станции S2234, в которых были установлены обильные выделения **сульфидов**.



Долериты с сульфидной минерализацией.

Фото - П.Мороцци (Институт морской геологии, Болонья, Италия)

На станциях S2231 и S2232 преобладают серпентинизированные, амфиболизированные мантийные ультрабазиты и развиты брекчии с обломками ультраосновных пород. На станции S2234 подняты комплексы пород с преобладанием габбро, габбро-долеритов и долеритов. Эти породы представляют собой фрагменты дайкового комплекса, о чем можно судить по прямолинейным закалочным контактам между среднезернистым габбро и долеритами с образованием афировых базальтов. В долеритах развиты зеркала скольжения и тонкие зоны расщепления.

Наиболее детально особенности рудообразующих процессов в зоне разлома Сьерра-Леоне были изучены в ходе исследования каменного материала, полученного на станции S2234. При этом особое внимание было уделено долеритовым порфирирам, содержащим сульфидную минерализацию. Породы в значительной мере изменены с широким развитием в основной массе вторичных минералов - амфиболов, хлоритов и т.д. В то же время, порфировидные плагиоклазы, достаточно свежие, сохранили свой первичный магматогенный облик. Термобарогеохимическим анализом выявлены флюидные включения во вторичных минералах (амфиболы) и расплавные включения в крупных порфировидных плагиоклазах.

Методы исследования. Составы сульфидов, расплавных включений и минералов-хозяинов, содержащих включения, установлены на рентгеновском микроанализаторе «Camebax-micro». Расплавные включения исследовались в высокотемпературной термокамере с инертной средой [Соболев, Слуцкий, 1984]. Эксперименты с включениями при высоких температурах проводились с учетом рекомендаций, предложенных в работах [Магматогенная кристаллизация..., 1975; Sobolev, Danyashevsky, 1994] и на основе собственного опыта [Симонов, 1993]. Флюидные включения изучались с помощью методов термометрии и криометрии [Ермаков, Долгов, 1979; Roedder, 1984] в среднетемпературной термокамере и в криокамере оригинальных конструкций [Симонов, 1993]. Данные по расплавным включениям обработаны на компьютере, и в результате расчетного моделирования по программе PETROLOG [Danyushevsky, 1998] получена дополнительная информация о параметрах базальтовых магматических систем.

Аналитические исследования проведены в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН, г. Новосибирск.

Петролого-минералогические особенности пород. Гидротермальные образования станций S2231, S2232 представлены в основном карбонатными прожилками в ультрабазитах, часто с жеодами, щетками и друзами мелких кристаллов арагонита. Особый интерес представляют брекчии, состоящие из обломков серпентинитов, сцементированных карбонатным материалом, на которые нарастают друзы удлиненных кристалликов (с размерами кристаллических фаз до 5 мм) арагонита. В районе станции S2234 воздействие на породы гидротермальных систем выразилось в замещении клинопироксена амфиболами преимущественно актинолитового ряда и в широком развитии сульфидов. Для выявления особенностей рудообразующих процессов в зоне разлома

Сьерра-Леоне наиболее детально были изучены образцы долеритовых порфиров, поднятых драгой на станции S2234, которые содержат вкрапленники достаточно свежего плагиоклаза (размерами до 5 мм) и замещенного актинолитом и хлоритом клинопироксена (до 1 мм). Основная масса обладает преимущественно долеритовой структурой с удлиненными микрокристаллами (до 0,5 мм) плагиоклаза. Для рассмотренных образцов (S2234/22, S2234/37) характерны многочисленные выделения (до 4 мм) сульфидов, заполняющих, в одних случаях, интерстиции между мелкими удлиненными кристалликами плагиоклаза в основной массе порфирита, в других - сульфиды проникают по трещинкам в измененных вкрапленниках преимущественно пироксена, располагаясь также по границам крупных зерен. Таким образом, судя по формам выделения и по особенностям взаимоотношения с силикатами, можно предположить, что сульфиды первой группы формировались на последних этапах магматических процессов, а второй тип является явно наложенным, возникшим в результате воздействия гидротермальных процессов. О разном происхождении рассмотренных сульфидов свидетельствуют и их составы.

Таким образом, отмеченные выше особенности сульфидной минерализации позволяют говорить о том, что сульфиды формировались при активном участии не только гидротермальных, но и магматических систем. Параметры растворов и расплавов были установлены нами на основании изучения расплавных и флюидных включений.

Расплавные включения. В плагиоклазе долеритового порфирита (образец S2234/37) были найдены и исследованы первичные расплавные включения (размерами 5-30 мкм), располагающиеся в виде прямолинейных зон, полос, иногда заполняющие целиком небольшие вкрапленники. Включения имеют форму ограненных табличек. Во включениях преобладают мелкозернистые светлые и темные фазы. Температуры гомогенизации включений достаточно высокие и варьируют в диапазоне от 1210 до 1255°C. Несмотря на большой разброс значений во включениях, наблюдается устойчивая прямая корреляция температур гомогенизации и содержания магния. Температуры гомогенизации в большинстве случаев согласуются с рассчитанными по программе PETROLOG ликвидусными температурами, попадая в пределы точности измерений использованным термометром, что может косвенно свидетельствовать об относительной сухости расплавов. Эти данные служат независимыми критериями достоверности полученных нами результатов исследования включений. Анализ состава включений показал, что при снижении температуры расплавы практически не меняют значения таких характерных геохимических характеристик как FeO/MgO и содержание TiO₂. Установлен также узкий диапазон железистости (примерно 0,8 – 1) и отсутствие зависимости от этого показателя содержания титана. Все эти данные свидетельствуют об отсутствии процессов фракционирования и примитивном характере расплава. В целом, учитывая очень низкие содержания калия в составах расплавных включений, магмы, формировавшие габбро-долеритовые комплексы станции S2234 принадлежат к типу N-MORB. Оценки параметров плавления мантийного субстрата с образованием первичных базальтовых

магм [Schilling et al., 1995], проведенные для пород станции S2234 были проведены на основе данных изучения расплавных включений. Они показали, что основные значения глубин плавления соответствуют 40 – 80 км, а температур - около 1310-1470°C. Эти результаты согласуются с полученными ранее оценками глубин выплавления первичных расплавов в Срединно-Атлантическом хребте [Симонов и др., 1999; Schilling et al., 1995; Shen, Forsyth, 1995]. Сравнение физико-химических условий кристаллизации магм с параметрами первичных расплавов показало, что нет отчетливой зависимости как составов, так и температур магматических систем, из которых образовывались рассмотренные габбро-долеритовые комплексы, от глубин генерации первичных мантийных магм. Единственное, что можно отметить, это некоторое снижение содержания магния в ликвидусных расплавах при увеличении глубины магмогенерации.

В общем, анализ расплавных включений показал, что магматические комплексы пород со станции S2234 формировались из низкокалийных примитивных расплавов типа N-MORB, скорее всего не содержащих существенного количества воды.

Все это свидетельствует о том, что эндогенные флюидные компоненты из этих расплавов вряд ли могли оказать значительное влияние на состав гидротермальных растворов, преобразовавших данные породы.

Флюидные включения. Значительная часть рудной минерализации в образцах, отобранных на станции S2234, связана, скорее всего, с гидротермальными процессами. Иными словами, гидротермальные растворы, преобразовывавшие первичные породы с формированием ассоциаций вторичных минералов, были в определенной мере ответственны за образование сульфидов.

В амфиболах образца S2234/22 были найдены флюидные включения размером 5-15 мкм, равномерно располагающиеся в минерале - скорее всего мнимовторичные. Плоские, с некоторой огранкой, включения содержат светлую жидкость и небольшой газовый пузырек. При исследовании в микрокриокамере было установлено, что температуры эвтектики составляют -22,7 - -22,9°C, что свидетельствует о преобладании в растворе солей натрия - в основном NaCl с примесью Na₂SO₄ и KCl. Растворение последних кристалликов наблюдалось в интервале -2,5 - -3,2°C, т.е. концентрация солей составляет 3,8-5 мас. %. Эксперименты в микротермокамере показали, что полностью гомогенными включения становятся при 174 - 196°C. С учетом поправки на давление (минимум 350 бар), согласно глубине отбора образцов на станции S2234, температуры гидротермальных растворов составляют 205 - 226°C.

В результате проведенных исследований флюидных включений во вторичных минералах из долеритов станции S2234 было

выяснено, что в данном районе активно действуют гидротермальные системы с температурами 205 - 226°C, в растворах которых преобладает NaCl с примесью Na₂SO₄ и KCl, с общей концентрацией солей 3,8-5 мас. %. Незначительные содержания солей (с преобладанием соединений натрия) говорит о том, что источником данных гидротермальных растворов была морская вода. Наличие в составе гидротерм Na₂SO₄ свидетельствует в пользу их активного участия при образовании сульфидной минерализации.

Заключение

1. В габбро-долеритах и долеритах, среди сульфидных рудных минералов пород со станции S2234, преобладают кубанит, халькопирит и пирротин. Анализ особенностей выделения и составов сульфидов позволяют говорить о том, что в их формировании участвовали, как гидротермальные, так и магматические процессы.

2. Магматические комплексы пород со станции S2234 формировались, согласно данным анализа расплавных включений, из высокотемпературных (1210 - 1255°C) низкокальциевых расплавов типа N-MORB, не содержащих существенного количества воды.

3. Габбро и долериты, поднятые на станции S2234, согласно данным анализа флюидных включений, находились в области влияния активно действующей гидротермальной системы с температурами 205 - 226°C. При этом в растворах преобладает NaCl с общей концентрацией солей 3,8-5 мас. %. Их незначительное содержание (с преобладанием соединений натрия) свидетельствует о том, что источником данных гидротермальных растворов была морская вода, а наличие в составе гидротерм Na₂SO₄ говорит об активном участии солей при образовании сульфидов.

4. В целом, изученные сульфиды станции S2234 имеют как гидротермальное, так и магматическое происхождение и формировались, скорее всего, не на поверхности дна океана, а на уровне субинтрузивных габбро-долеритовых комплексов. При этом в рудообразующих процессах принимали активное участие условно «сухие», с минимумом воды, расплавы типа N-MORB и низкоконцентрированные гидротермальные растворы, имеющие в своей основе морскую воду.

5. Теоретические предположения о связи положения гидротермальных систем с областями пониженной сейсмичности [Мазарович, Соколов, 1998] не противоречат результатам геологического опробования в районе разлома Сьерра-Леоне и могут быть приняты за основу планирования морских экспедиций по обсуждаемой тематике. Анализ детальной батиметрической карты с сечением рельефа 10 м показывает, что в районе станции S2234, между двумя ветвями рифта располагается поверхность дна с большим количеством холмов с высотой 20 – 30 м и гор (до 200 м) округлой формы, которые могут быть интерпретированы как вулканическое постройки центрального типа. Рельеф подобного типа весьма характерен для районов, где обнаружены черные курильщики [Богданов, 1997]. Можно предполагать, что именно этот район представляет первоочередной интерес для проведения детального поиска новых рудообразующих гидротермальных систем.

Литература

- Богданов Ю.А. Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный мир. 1997, 167 с.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979. 271 с.
- Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов // Под ред. Соболева В.С., Костюка В.П. Новосибирск: Наука, 1975. 232 с.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте // Литология и полез. ископаемые. 1998. № 4. С. 436–439
- Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). // Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.
- 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.
- Соболев А.В., Слуцкий А.Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика. 1984. № 12. С. 97-110.
- Экваториальный сегмент Срединно-Атлантического хребта. Приложение к монографии "Экваториальный сегмент Срединно-Атлантического хребта". МОК ЮНЕСКО, ГЕОХИ РАН: АТКАР ПКО "Картография", 1997. 33 с.
- CNSS Earthquake Composite Catalog, June 1997 (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>)
- Danyushevsky L.V. The effect of small amount of H₂O on fractionation of mid-ocean ridge magmas. // Abstr. AGU Spring Meeting. EOS 79. 1998. №. 17/suppl. P. 375.
- Peyve A., Bonatti E., Brunelli D. et al. New data on some major MAR structures: preliminary results of R/V Akademik Nikolaj Strakhov 22 cruise // InterRidge News. 2000. V. 9. № 2. P. 28.
- Roedder E. Fluid inclusions // Mineral. Soc. Amer. 1984. 644 p.
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. # B5. P. 10039-10054. (<ftp://topex.ucsd.edu/pub/>)
- Schilling J.-G., Ruppel C., Davis A.N., McCully B., Tighe S.A., Kingsley R.H., Lin J. Thermal structure of the mantle beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge: Influences from the spatial variation of dredged basalt glass compositions // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, # B7.

P. 10057-10076.

Shen Y., Forsyth D.W. Geochemical constraints on initial and final depths of melting beneath mid-ocean ridges // J. Geophys. Res., 1995. V. 100. # B2. P. 2211-2237.

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. Petrology and Geochemistry of Boninites from the North Termination of the Tonga Trench: Constraints on the Generation Conditions of Primary High-Ca Boninite Magmas // J. Petrol. 1994. V. 35. P. 1183-1211.

[к началу](#)

2002 год

Российский журнал Наук о Земле. 2002.

Положение и перспективы открытия гидротермальных полей в Срединно-Атлантическом хребте

А.О. Мазарович, С.Ю. Соколов

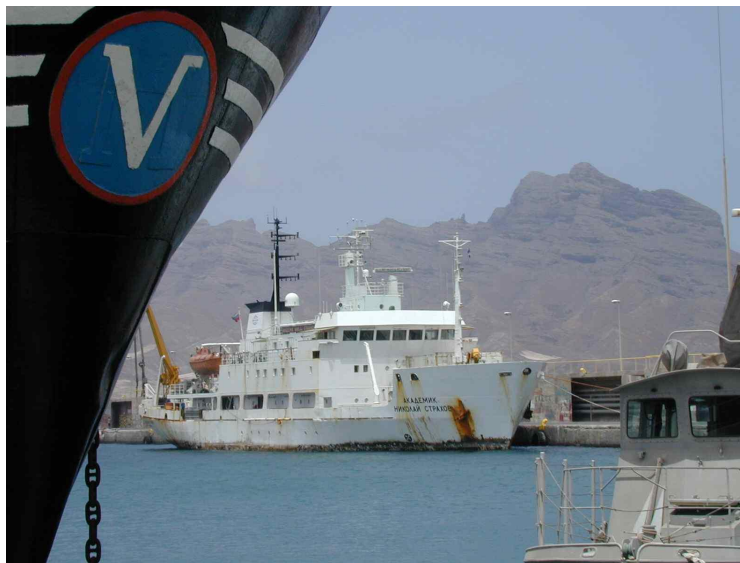
АННОТАЦИЯ

Проанализировано положение активных и неактивных гидротермальных полей, а также находок сульфидов в пределах Срединно-Атлантического хребта между 65° с.ш. и 65° ю.ш. Предложен прогноз положения сульфидных месторождений в Атлантическом океане.

Введение

[Анализ базы данных международного проекта InterRidge](#) [Hannington, 2001] показывает, что к настоящему моменту во всех океанах Земли, включая моря, открыто 97 активных гидротермальных полей. Из общего количества точек 15 приходятся на бассейн Атлантического океана, 72 – Тихого, остальные - на Индийский и Северно-Ледовитый океаны. Предметом нашего рассмотрения

будет только Атлантический океан между Исландией на севере и районом тройной точки Буве на юге. Несколько лет назад авторы статьи обратили внимание [Мазарович, Соколов, 1998], что в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) гидротермальные поля тяготеют к рифтовым зонам для которых характерен пониженный фон сейсмичности или полное ее отсутствие (для выборок событий с магнитудой выше 4). Кроме того, в этих областях были установлены разрывы (“discontinuity”). Анализ проводился от, примерно, 14° с.ш. до 30° с.ш. Эти два признака позволили предположить, что южнее 7° с.ш. в Атлантическом океане могут находиться гидротермальные рудопроявления. Здесь, летом 2000 года был проведен 22-ой рейс НИС Геологического института РАН «Академик Николай Страхов» [Peuve et al., 2000], который позволил обнаружить породы с гидротермальными изменениями и с сульфидной минерализацией.



НИС «Академик Николай Страхов» в порту Минделу (Республика Кабо Верде), 2000 год



НИС «Академик Иоффе» в Антарктиде

Новые данные составили основу прогноза на открытие сульфидной минерализации в этом районе [Мазарович и др., 2001]. В 2001 году здесь прошли работы экспедиции ГИН РАН на НИС «Академик Иоффе» (начальник экспедиции – С.Г.Сколотнев), которые опирались на вышеупомянутый прогноз, а также на батиметрическую съемку при помощи многолучевого эхолота SIMRAD ЕМ-12 на НИС «Академик Николай Страхов». Они принесли новые данные о наличии сульфидов в прогнозированной точке, а также в другом сегменте рифта с пониженным фоном сейсмичности - глубочайшей впадине в пределах рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта (впадина Маркова - 4975 м).

Все вышесказанное является веским доводом в пользу того, что асейсмичные области (в смысле отсутствия сильных событий при невозможности регистрировать слабые вдоль всей оси хребта) срединно-океанических хребтов с небольшой скоростью спрединга представляют собой районы наиболее благоприятные для формирования гидротермальных систем и, следовательно, для концентрации сульфидных минералов. Эти соображения позволяют делать прогноз наиболее вероятных районов находок сульфидной минерализации в Атлантическом океане.

В основу прогноза легли данные спутниковой альтиметрии [Sandwell, Smith, 1997, Smith, Sandwell, 1997], положение эпицентров землетрясений [CNSS., 1997], а также различные геологические данные.

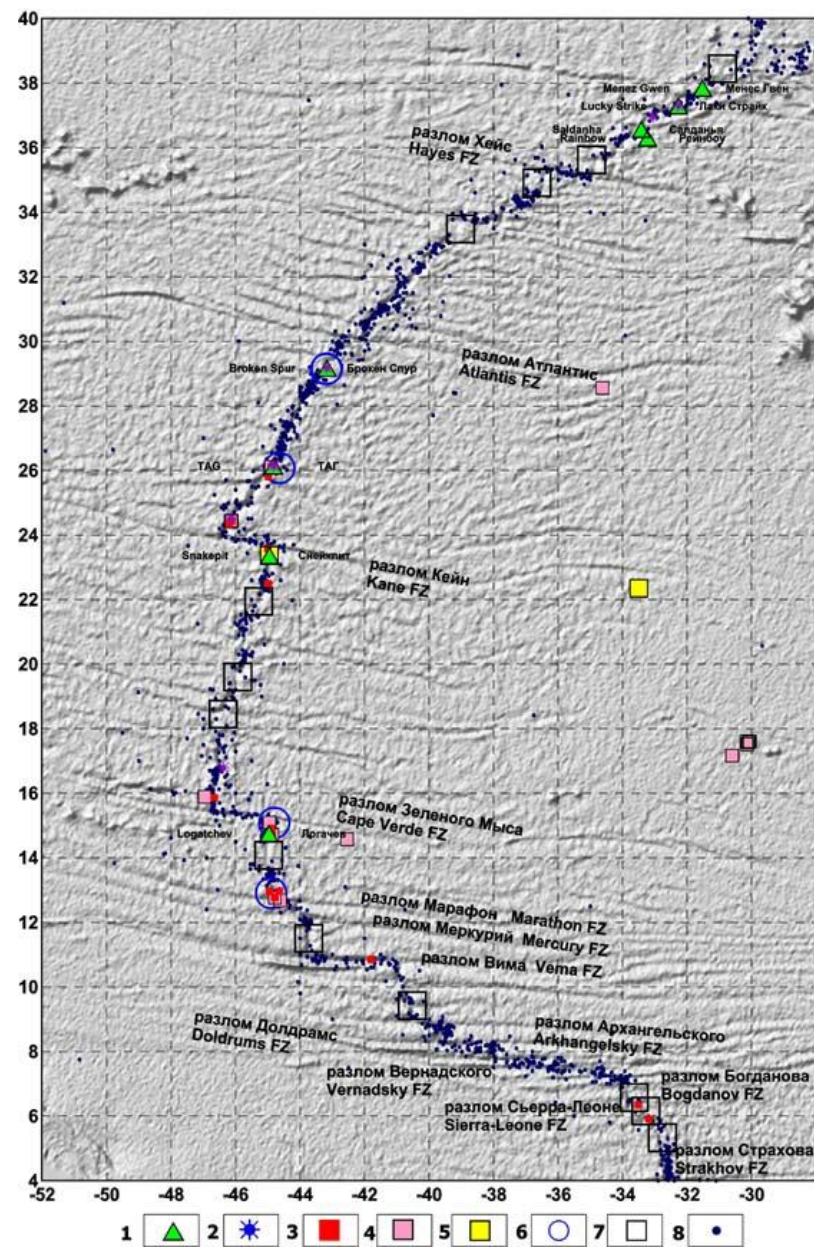
Положение гидротермальных полей и сульфидной минерализации в Атлантике

В Атлантическом океане к настоящему времени обнаружено несколько активных и неактивных гидротермальных полей и метановые факелы, которые открыты между районом 14° с.ш. и Исландией ([рис. 1](#)).

Рис. 1. Положение активных и неактивных гидротермальных полей и сульфидной минерализации в северной части Срединно-Атлантического хребта

Картографическая основа – предсказанная топография [Smith, Sandwell, 1997]
Положение эпицентров землетрясений (CNSS Earthquake Composite Catalog).

1 – 2 гидротермальные поля:
1 – активные (с названиями),
2 – неактивные;
3 - сульфидная минерализация;
4 - гидротермальные изменения пород;
5 - металлоносные осадки;
6 - метановые факелы;
7 - районы перспективные на открытие сульфидной минерализации или активных гидротермальных полей;
8 - эпицентры землетрясений

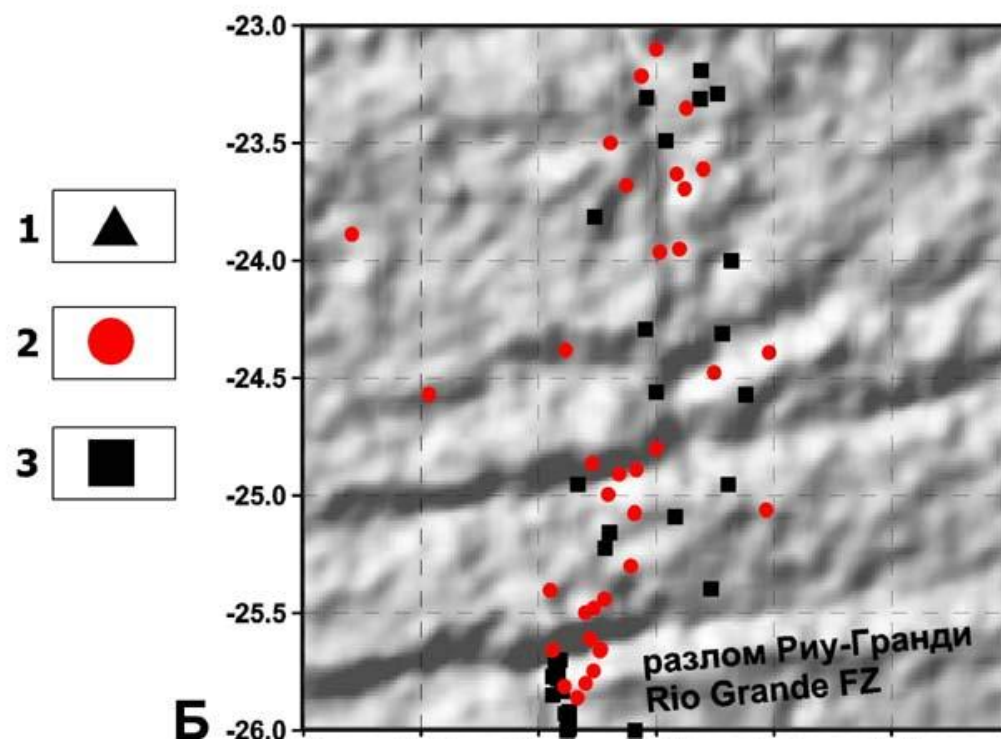
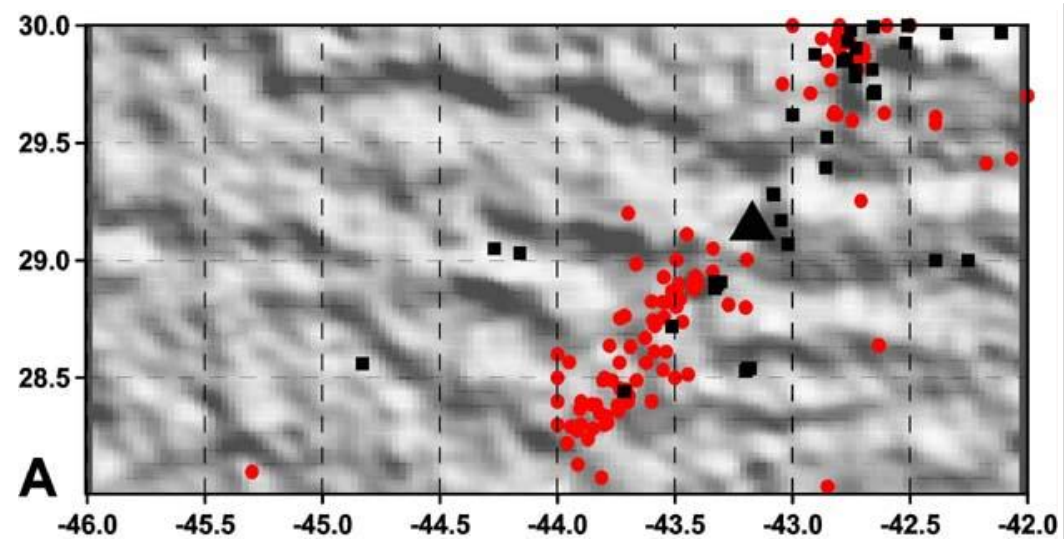


Положение гидротермальных полей

Анализ тектонического положения активных гидротермальных полей показывает, что существует две основных группы. Первая (Рейнбоу, Лаки Страйк, Рейкьянес и др.) концентрируется на участках Срединно-Атлантического хребта непосредственно прилегающих к Азорской и Исландским горячим точкам. Для этих частей спрединговой системы характерно отсутствие трансформных разломов со значительными смещениями и сглаженная морфология рельефа. Особенности их строения неоднократно рассматривались в литературе (например – [Альмухамедов и др., 1990]). Вторая группа (Брокен Спур, ТАГ и др.) находятся в части хребта для которой характерно существование крупных трансформных разломов (Атлантис, Кейн, Зеленого Мыса), отстоящих друг от друга на сотни километров, между которыми устанавливается большое количество разрывов (“discontinuity”). Глубина положения полей изменяется от сотен метров (хребет Рейкьянес) до 3650 м (активный холм ТАГ). Именно в областях изгибов рифтовых долин и концентрируются «черные курильщики». Как пример можно рассмотреть положение поля Брокен Спур ([рис. 2а](#)). Здесь отчетливо видны «подходы» разрывов и искривления рифтовой долины.

Рис. 2. Соотношение разрывов и асейсмичных участков Срединно-Атлантического хребта.

**А - Положение поля Брокен Спур
Б – район в южной части Атлантического океана**



Распределение эпицентров землетрясений [CNSS..., 1997].

Картографическая основа – предсказанная топография [Smith, Sandwell, 1997].

1 – активное гидротермальное поле Брокен Спур

2 – эпицентры землетрясений

3 – положение драгировок

Положение неактивных гидротермальных полей совпадает с зонами активной гидротермальной деятельности, за исключением построек севернее разлома Зеленого Мыса и севернее разлома Кейн. Однако в обоих случаях эти районы также отличаются относительно меньшей сейсмичностью. Глубина положения полей изменяется от 1700 м (Лаки Страйк) до 3900 м (район 24°30' с.ш.).

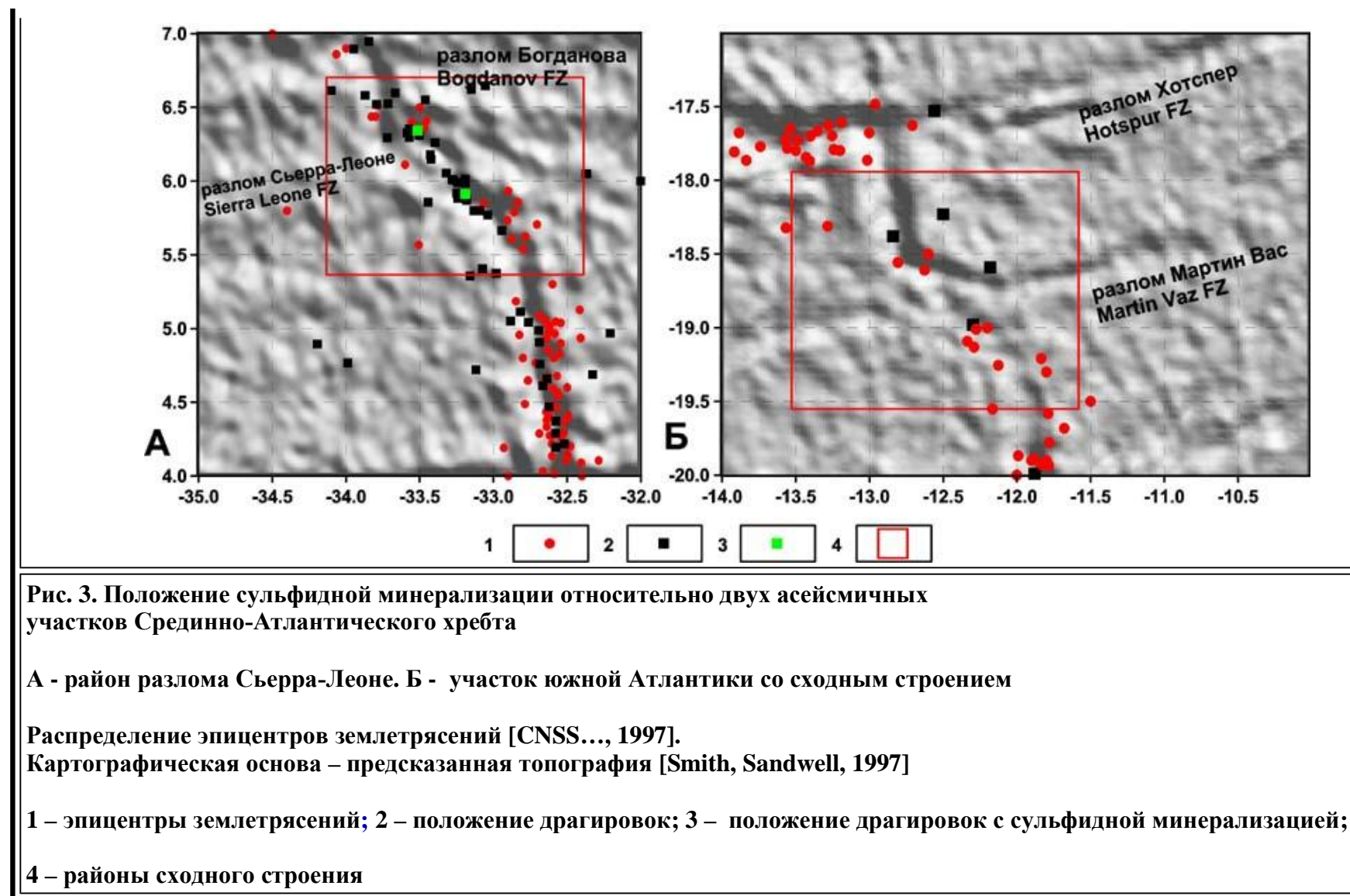
Положение сульфидной минерализации

Проявления сульфидной минерализации разного генезиса, а также зоны интенсивной гидротермальной проработки коренных пород имеют более широкую географию – от района разлома Атлантис до тройной точки Буве. Глубина станций, с которых поднимались сульфиды изменяется от 2200 м (гора Ферсмана) до 4800 м (впадина Маркова).

Помимо широко известных данных в отечественной и зарубежной литературе содержатся сведения, дополняющие базу данных InterRidge о сульфидной минерализации и дегазации из океанского дна. Эта информация была получена в ходе экспедиций НИС "Антарес", 9 рейс, драга 46 (1990), НИС "Академик Николай Страхов", 7 рейс, драга 71 (1988 г.), 9 рейс, драга 27, 36, 41 (1989 г.), 18 рейс, драга 43 (1994 г.), 22 рейс, драга 34 (2000 г.), НИС "Джеймс Джиллис", 7309 рейс, драга 58, 93 (1973 г.), НИС "Пиллсбери", 7003 рейс, драга 25 (1970 г.), НИС "Геолог Ферсман", рейс неизвестен, драга 74, 130, 192, НИС "Академик Иоффе", 10 рейс, драга 32 (2001 г.), НИС "Геленжик", 96 рейс, драга 17 (1996 г.), НИС "Академик Курчатов", 20 рейс, фото газовых пузырей (1975 г.)

Сульфиды поднимались из разных частей склонов рифтовых долин, с угловых поднятий (гора Ферсмана), поперечных хребтов (запад активной части разлома Романш), непосредственно в областях разрывов (разлом Сьерра-Леоне) ([рис.3 А](#)), а также вне современных рифтов (район о.Буве и хребет Шписс). Практически во всех случаях их нахождение было связано с зонами тектонизации и интенсивной гидротермальной переработки вмещающих пород и совпадает с зонами пониженного фона сейсмичности.





**Вероятное положение сульфидной минерализации
 в структуре южной Атлантики между экватором и 55° ю.ш.**

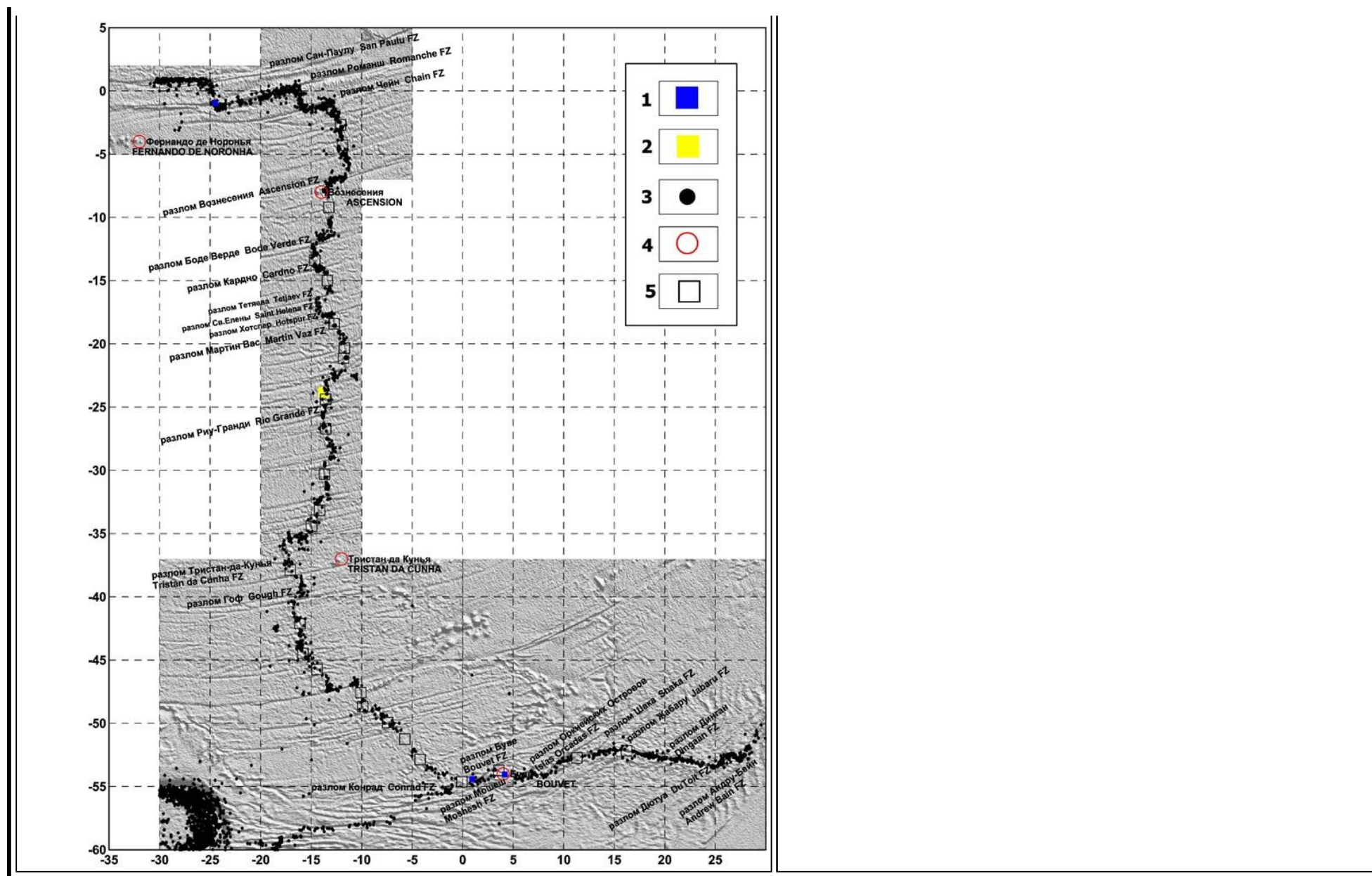
В Южной Атлантике имеются только единичные находки сульфидов и одно указание на гидротермальную переработку пород (район 24° ю.ш.) ([рис. 4](#)).

Рис. 4. Прогнозная карта сульфидной минерализации в южной части Сединно- Атлантического хребта

Распределение эпицентров землетрясений [CNSS..., 1997].

Картографическая основа – предсказанная топография [Smith, Sandwell, 1997]

1 – сульфидная минерализация;
2 – гидротермальные изменения пород;
3 - эпицентры землетрясений ;
4 - горячие точки;
5 - районы перспективные на открытие сульфидной минерализации или активных гидротермальных полей;



Срединно-Атлантический хребет характеризуется субмеридиональным простираем и не испытывает крупных изгибов или трансформных смещений. Наложение эпицентров землетрясений на альтиметрию показало, что здесь, также как и в северной Атлантике существуют асейсмичные участки, причем некоторые из них по своей протяженности превышают аналогичные участки в северной части (южнее о. Вознесения, 52° ю.ш.) (рис. 4). Обращает на себя внимание, что они могут быть как связанными с зонами разрывов, так и нет. Исходя из принципов, которые обсуждались в предыдущем разделе, видимо, целесообразно сосредоточить внимание на первых. Такими перспективными районами могут быть районы южнее о. Вознесения, который отличается очень сложным строением, район между разломами Мартин Вас и Хотспер, 20° ю.ш. (рис. 3 Б) и район 45° ю.ш. Два сходных участка имеются и на Африкано-Антарктическом хребте (см. рис. 4) – районы разлома Шака и Жабару.

Особое место занимают зоны асейсмичности в районе тройной точки Буве. Как уже говорилось выше, в них также была обнаружена сульфидная минерализация. Первый район представляет собой хребет Шписс на котором была закартирована огромная кальдера. Известно, что с крупной кальдерой Осевого вулкана (Axial Volcano), правда в другой геодинамической обстановке, на хребте Хуан-де-Фука, связано крупное гидротермальное поле, которое изучается сейчас в рамках проекта NeMO (New Millenium Observatory) (http://newport.pmel.noaa.gov/nemo_cruise98/project.html). Второй район расположен непосредственно около о. Буве или, другими словами, в районе горячей точки Буве.

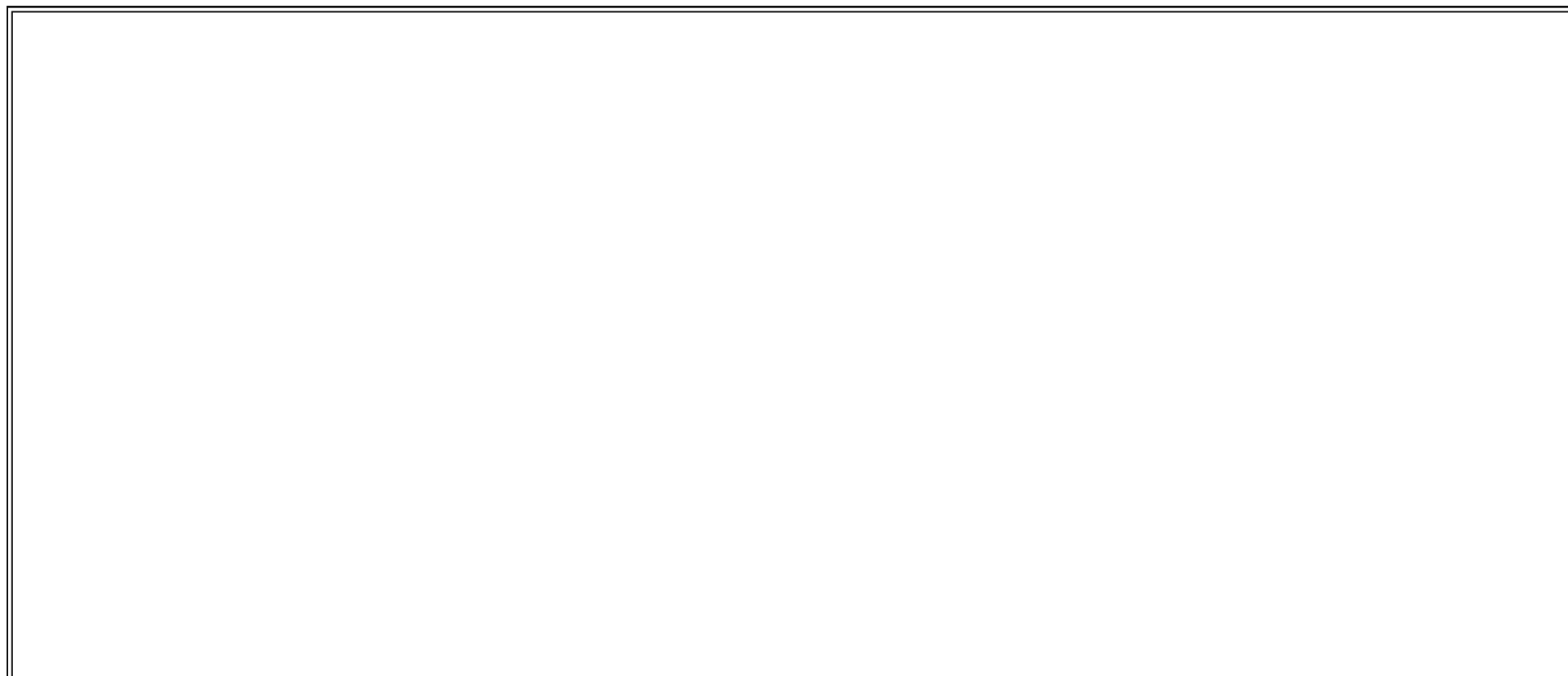
ОБСУЖДЕНИЕ

Срединно-Атлантический хребет относительно неплохо изучен драгировками, которые были получены в течение более чем 100 лет. Общее количество полученных образцов авторам не известно, но мы располагаем данными о 4500 станций. Судя по этой случайной выборке, хребет изучался в диапазоне глубин от 5000 м до первых десятков метров. Были опробованы все основные морфоструктуры рифтовых долин и активных частей трансформных разломов. При этом количество драгировок с сульфидной минерализации составляет малый процент. Так, например, НИС «Академик Николай Страхов» провел около 850 драгировок из них только 6 содержали сульфиды (0.7 %). Это доказывает, что сульфиды не развиты в пределах всего хребта в виде сплошного пояса, а локализуются в определенных узлах.

Важнейшим вопросом для понимания положения сульфидной минерализации должен быть вопрос о природе асейсмичных участков хребта. Наиболее вероятным представляется относительно сильный прогрев этих районов, который обеспечивает пластичность литосферы. Это подтверждают и данные о тепловом потоке [Подгорных, Хуторской, 1997]. В пределах осевой зоны Срединно-

Атлантического хребта повышенные значения теплового потока (>70 мВт/м²) отмечались именно на асеймичных участках (например район впадины Маркова, в районе 10 с.ш., разлом Св.Петра). Хотя повышенные тепловые потоки отмечаются и на поперечных хребтах (разлом Вима). Аномальность рассматриваемых районов проявляется и в рельефе. Здесь существуют сложно построенные узлы, отличительной чертой которых являются крупные блоки внутри зон разрывов (например гора Леонова в разломе Сьерра-Леоне, разлом Св.Петра, участок рифта между разломами Зеленого Мыса и Марафон), которые были хорошо закартированы многолучевыми эхолотами во время экспедиций НИС «Академик Николай Страхов». Судя по данным «предсказанной топографии» [Smith, Sandwell, 1997] такие зоны существуют и в южной части Атлантики (см. [рис. 3Б, 4](#)).

Перейдем к корреляции обсуждаемых данных по профилю вдоль Срединно-Атлантического хребта ([рис. 5](#)).



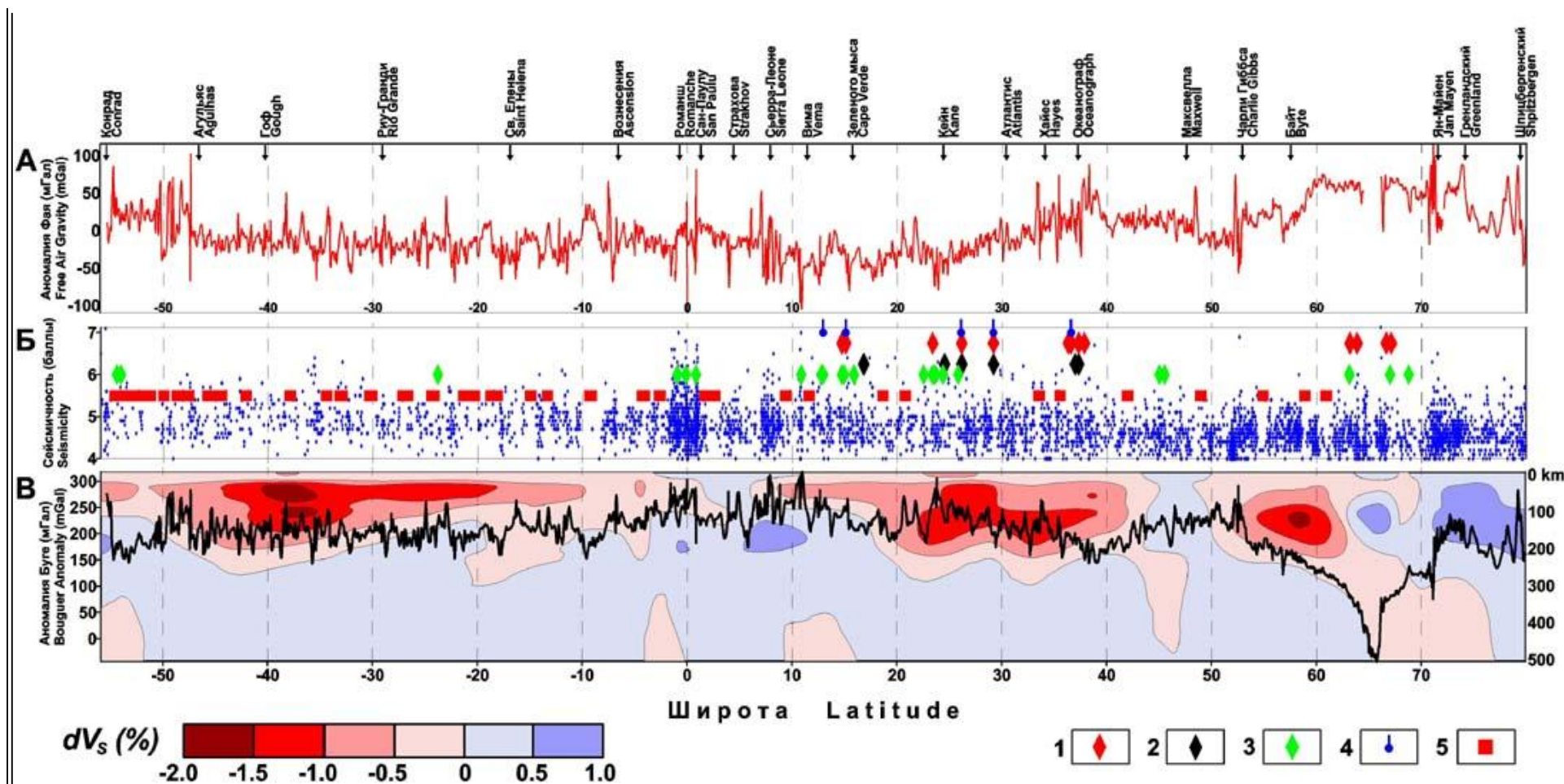


Рис. 5. Корреляция геофизических полей, сейсмичности и гидротермальных проявлений вдоль Срединно-Атлантического хребта

А – аномалия силы тяжести в свободном воздухе по данным спутниковой альтиметрии [Sandwell, Smith, 1997] и пересечения САХ трансформными разломами;

Б – сейсмичность вдоль САХ (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>), гидротермальные проявления и их прогноз: 1 – активные гидротермальные проявления; 2 – пассивные гидротермальные проявления; 3 – сульфидные руденения; 4 – метановые «факелы»; 5 – районы, перспективные на сульфидную минерализацию или гидротермальную активность;

В – разрез вариаций скоростей поперечных волн по данным сейсмотомографической модели RG5.5 [Zhang, Tanimoto, 1992] и классическая аномалия Буге.

На рисунке обобщена информация о рельефе и силе тяжести в свободном воздухе, сейсмичности, положения сульфидной минерализации, аномалиям Буге и сейсмической томографии. По отношению ко всему, связанному собственно с сульфидной минерализацией, сейсмическая томография, сейсмичность и гравитационные аномалии представляют собой фоновый набор данных, на базе которого производится корреляция. Этот набор характерен непротиворечивой взаимной интерпретацией коррелируемых аномалий и особенностей, выделяемых на профиле, на чем следует остановиться подробнее.

Сейсмическая томография, полученная по данным поперечных волн, в наибольшей степени отражает температурный режим и частичную расплавленность мантии [Becker, Boschi, 2002]. Для анализа была выбрана модель RG5.5 [Zhang, Tanimoto, 1992], представленная для сферических гармоник до 36 порядка при параметризации на блоках $5^\circ \times 5^\circ$, в частности профиль вариации скорости вдоль САХ до глубины 500 км. На этом профиле отчетливо видны три минимума (см. [рис. 5 В](#)), соответствующие (с севера на юг) Исландскому, Азорскому и южноатлантическому плюмам. Особенностью базальтового магматизма над этими плюмами [Дмитриев и др., 1999] является повышенная продуктивность, что при низкой скорости спрединга создает отчетливые положительные аномалии рельефа дна вдоль оси хребта, поскольку накопление базальтовых продуктов в этих зонах САХ будет существенно большим, чем в зонах проявления фонового типа магматизма [Dmitriev et al, 2001b]. Эти аномалии рельефа формируют соответствующие аномалии силы тяжести в свободном воздухе (см. [рис. 5 А](#)), которые в значительной степени отражают вариацию наиболее контрастной плотностной границы вода/дно (кора). Устранение влияния рельефа из значений аномалии силы тяжести в свободном воздухе по схеме классической аномалии Буге для плотности 2.75 г/см^3 оставляет в аномальном поле составляющую, в основном представляющую вариацию границы М, поскольку это следующая наиболее контрастная граница плотностного разреза вблизи поверхности (см. [рис. 5 В](#)). Полученная аномалия Буге вследствие работы изостатических механизмов зеркальным образом (по сравнению с аномалиями в свободном воздухе) отражает аномалии рельефа, связанные с интенсивными выплавками базальтов плюмовой ассоциации. Кроме влияния границы М в этой аномалии присутствует влияние и более глубоких (но менее контрастных) плотностных неоднородностей, вклады которых в аномальное поле мы не разделяли. Отметим совпадение главных зон минимумов аномалии Буге с соответствующими минимумами томографического разреза, представленными зонами разуплотненной мантии, но при этом также отметим отчетливо заметное южное смещение центров Азорского и Исландского плюмов приблизительно в 10 дуговых градусов ($\sim 1000 \text{ км}$). Существование подобного смещения томографических аномалий от аномалий Буге связано с тем, что вклад глубинных вариаций плотности существенно меньше вклада в аномалию Буге вариации границы М. Это означает, что расположение разуплотненного мантийного вещества плюма смещено относительно массивных базальтовых

выплавов, подчеркнутых гравитационными аномалиями. Сказанное не противоречит имеющимся литературным данным о южной миграции Азорского плюма [Dmitriev et al, 2001a; Дмитриев и др., 2001; Cannat et al, 1999].

Перейдем к анализу **рис. 5 Б**, фоновую основу которого составляют данные о сейсмичности [CNSS..., 1997]. Корреляция сейсмичности с другими геофизическими параметрами **рис. 5** показывает, что в области проявления плюмов сейсмические события происходят чаще и с меньшей магнитудой, чем в области «холодной» мантии в приэкваториальной зоне и отдельных фрагментов на севере. Подробнее корреляция сейсмичности с геофизическими и петрологическими параметрами изложена в [Дмитриев и др., 1999]. Сказанное не относится к пониженному уровню частоты сейсмических событий в Южной Атлантике, который обусловлен менее плотной системой регистрирующих станций в этой части света. Отчетливо видно, что распределение сейсмичности вдоль хребта имеет характер «сгустков» размером около 1.5–2 дуговых градуса, к промежуткам между которыми тяготеют известные проявления сульфидной минерализации и других явлений связанных с ней. Рассматривая относительно хорошо изученную Северную Атлантику необходимо отметить, что проявления сульфидной минерализации тяготеют не просто к зонам пониженной частоты сильной (для выборок событий более 4 баллов) сейсмичности, а к зонам ассоциированным с плюмовыми явлениями в верхней мантии.

На наш взгляд наиболее вероятным механизмом, реализующим эту связь, является то, что наличие плюма, продвигающегося (или просто функционирующего) вдоль хребта приводит к возникновению дополнительной системы трещиноватости коры, что облегчает доступ воды, ее циркуляцию и обогащение компонентами, свойственными гидротермальным растворам. Кроме того, интенсивный базальтовый магматизм плюмового типа, поставка в зоне плюма необходимых летучих компонент и повышенный тепловой поток создают дополнительные условия, способствующие гидротермальной активности. Зоны трещиноватости способствуют также развитию процессов серпентинизации и связанному с этим выделению метана [Charlou et al, 1998; Дмитриев, Базылев и др., 1999; Dmitriev et al, 2001b]. Отмечается также незначительное смещение на юг активных гидротермальных построек от пассивных, что также может свидетельствовать о миграции плюма и гидротермальных систем, взаимосвязанных с ним. Это означает, что обнаружение признаков гидротермальной деятельности, прогнозируемое в зонах отсутствия сильной сейсмичности, может осуществляться не только в областях современного наличия мантийных плюмов, но и в других областях, которые расположены вне зоны САХ и могут содержать гидротермальные палеопостройки.

ВЫВОДЫ

1. Активные и неактивные гидротермальные постройки и сульфидная минерализация в пределах осевой зоны САХ не располагаются случайным образом, а локализованы в пределах зон с повышенной пластичностью, которые отличаются пониженным фоном сейсмичности (для выборок с магнитудой больше 4).
2. С этими же зонами часто связано появление зон разрывов (“discontinuty”), которые могут являться дополнительным доказательством разуплотнения (повышенной пластичности) коры этих частей САХ.
3. Поиск гидротермальных построек и сульфидной минерализации целесообразно сосредоточить, помимо сказанного выше, в зонах развития плюмов, которые выявляются по сейсмотомографическим данным как в северной так и южной частях Атлантического океана.

Литература

Альмухамедов А.И., Богданов Ю.А., Кузьмин М.И., Сборщиков И.М., Хворова И.В., Сагалевиц А.М., Аношин Г.М., Бартенева Л.И., Беляев И.И., Бирюков С.Г., Кашинская И.В., Комаров А.В., Купцов В.М., Лисицина М.А., Лукашина М.П., Палкина А.М., Пальшин М.А., Подражанский А.Н., Попов Э.А., Попов В.А., Римский-Корсаков Н.А., Руденко М.В., Трухин В.И., Шрейдно А.А. Рифтовая зона хребта Рейкьянес: тектоника, магматизм, условия осадконакопления. М.: Наука, 1990. 236 с.

Геологические исследования в центральной Атлантике (Ред.: В.В. Шарапов, В.А. Симонов). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СОАН СССР. 1991. 192 С.

Дмитриев Л. В., Базылев Б. А., Силантьев С. А., Борисов М. В., Соколов С. Ю., Буго А. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти. // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т.1. №.6.

Дмитриев Л. В., Соколов С. Ю., Мелсон В. Г., О'Хирн Т. Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта. // Российский журнал наук о Земле. 1999 Ноябрь. Т.1. №.6.

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Короновский Н.В., Соколов Н.С. Миграция Азорского суперплюма по данным о корреляции петрологических и геофизических параметров. // Геология и геофизика срединно-океанических хребтов. Российское отделение InterRidge. (23-25 мая 2001 г.). с. 11.

Дубинин Е.П., Ушаков С.А. Океанический рифтогенез. М. ГЕОС. 2001. 293 с.

- Лукашин В.Н., Лисицын А.П., Иванов Г.В., Кравцов В.А., Русаков В.Ю. Исследование гидротермальных плюмов над рифтовой зоной Срединно-Атлантического хребта в районе 29° с.ш.//Океанология. 1997. Т.37. № 5. С.770-779.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте.//Литология и полезные ископаемые 1998. № 4. С. 436-439
- Мазарович А.О. Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир. 2000. 176 с.
- Мазарович А.О., В.А.Симонов, А.А.Пейве, С.В. Ковязин, Г.А. Третьяков, Ю.Н.Разницин, Г.Н.Савельева, С.Г.Сколотнев, С.Ю.Соколов, Н.Н.Турко. Гидротермальная минерализация разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 5. С. 1 – 8
- Отчет о 20-м рейсе научно-исследовательского судна "Академик Курчатов" (геолого-геофизическая экспедиция в Атлантический океан) 29.01-29.05.1975 года. ИОАН 1975.
- Погребницкий Ю.Е., Горячев Ю.В., Осипов В.А., Трухалев А.И. Строение океанической литосферы по результатам исследований на Анголо-Бразильском геотраверсе.// Советская геология.1990. №12. С.8-22.
- Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Карта планетарного теплового потока масштаба 1:30000000. М.–С-Пб.: ВНИИОкеангеология, 1997.
- Разницин Ю.Н., Сколотнев С.Г., Турко Н.Н., Мазарович А.О., Пейве А.А., Штеренберг Л.Е. Зона сочленения разлома Марафон с рифтовой долиной: структура, вещественный состав пород, сульфидная минерализация (Центральная Атлантика). // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. N 4. С. 952-956.
- Трухалев А.И., Воробьев П.В., Степанова Т.В., Степанов М.А. Некоторые черты тектоники и магматизма рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта в районе 24-25° с.ш. // Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. М.: Наука, 1993. С. 72-112.
- Becker T. W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. G3. V.3. January 10, 2002. Paper number 2001GC000168.
- Bonatti E., Guerstein-Honnorez B.M., Honnorez J. and Stern G. Hydrothermal pyrite concretions from the Romanche trench (Equatorial Atlantic): metallogenesis in oceanic fracture zones // Earth and Planet Sci. Lett. 1976. V. 32, ? 1. P. 21-37.
- Cannat M., Briaies A., Deplus C., Escarti J., Georgen J., Lin J., Mercouriev S., Meyzen C., Muller M., Pouliquen G., Rabain A., da Silva P. Mid-Atlantic Ridge–Azores hotspot interactions: along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago.// Earth Planet. Sci. Lett. 1999, 173, 257-269

Carrara G., Bortoluzzi G., Zittelini N., Bonatti E., Brunelli D., Cipriani A., Fabretti P., Gasperini L., Ligi M., Peniteni D., Sciuto P.F., Mazarovich A., Peyve A., Turko N., Skolotnev S., Gilod D. The Bouvet Triple Junction Region (South Atlantic): a report on two geological expeditions. //Giornale di Geologia. Ser. 3. 1997. V. 5911. # 2. P. 19 - 33.

Charlou J.L., Fouquet Y.,Bougault H., Donval J.P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Appriou P., Rona P. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15o20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge. // Geochim. Et Cosmochim. Acta, v. 62, #13, 1998, 2323-2333.

CNSS Earthquake Composite Catalog. June 1997 (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>)

Dmitriev L.V., Koronovsky N.V., Sokolov S.Yu., Sokolov N.S. Tectonic-magmatic history of the North Atlantic lithosphere formation by the isochrone gravity profiling. // European Geophysical Society. 26th General Assembly. 2001. Geoph. Res. Abs. 3. P. 818.

Dmitriev L.V., Silantiev S.A., Sokolov S.Yu. Plume and spreading TOR assemblages, spreading rate, ridge segmentation and geophysical fields distribution. // European Geophysical Society. 26th General Assembly. 2001. Geoph. Res. Abs. 3. P. 819.

Dmitriev L.V., Bazylev B.A., Borisov M.V., Bougault H., Silantiev S.A., Sokolov S.Yu. The serpentinization of the oceanic mantle peridotites and the Earth fluid regime. // European Geophysical Society. 26th General Assembly. 2001. Geoph. Res. Abs. 3. P. 795.

Hannington M. Hydrothermal Vent Database. InterRidge Databases. 2001.

(<http://triton.ori.u-tokyo.ac.jp/~intridge/data1.html>)

Peyve A., Bonatti E., Brunelli D., Chilikov A., Cipriani A., Dobrolubova K., Efimov V., Erofeev S., Ferrante V., Gasperini L., Hekinian R., Ligi M., Maurizio G., Mazarovich A., Perfiliev A., Raznitsin Y., Savelieva G., Sichler B., Simonov V., Skolotnev S., Sokolov S., Turko N. New data on some major MAR structures: preliminary results of R/V Akademik Nikolaj Strakhov 22 cruise // InterRidge News. V. 9 (2). 2000. P. 28.

Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. # B5. P.10039-10054.

Smith W. H. F., Sandwell D. T. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. Sept. 26. V. 277 (5334).

Zhang Y.S., Tanimoto T. Ridges, hotspots and their interaction, as observed in seismic velocity maps. // 1992, NATURE, 355, 45-49.

[к началу](#)

Atlantic Ocean Hydrothermal Fields

1998

Lithology and Mineral Resources, Vol. 33, No. 4, 1998, pp. 391-394. Translated from Litologiya i Poleznye iskopaemye, No. 4, 1998, pp. 436-439. Original Russian Text Copyright © 1998 by Mazarovich&Sokolov.

The Tectonic Position of Hydrothermal Fields on the Mid-Atlantic Ridge

A. O. Mazarovich and S. Yu. Sokolov

Received February 11, 1998

Abstract

The position of hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge has been compared to the satellite altimetry data and the position of earthquake epicenters (1937-1997). It has been established that the hydrothermal fields gravitate to the relatively stable (aseismic) parts of rift zones, which are most favorable for the stable circulation of solutions under the conditions of spreading at low velocities. Such regions are situated in the discontinuity areas. It is presumed that the solutions migrated not across the rift, as it has been believed, but in the directions with the best conditions of permeability, i.e., along the rift strike, in accordance with the orientation of cracks. In this case, the discharge areas must lie within the boundaries of most stable sites where the conditions for longterm (up to tens of thousands of years) stable circulation of hydrothermal solutions exist. The discontinuities seem to represent the regions with an increased amount of breccias or, in other words, with the increased open porosity and permeability. Thus, in the scheme proposed, the major circulation of oceanic water and its transformation into ore-forming fluids proceeds along the strike of rift zones.

The work at compiling a digital tectonic map of the Central Atlantic is carried out in the Laboratory of geomorphology and tectonics of the

oceanic floor, Institute of Geology, RAS. This work is accompanied by creating the database and analyzing widely diverse materials. In the course of these investigations, the authors have accumulated observations that might be of interest to the specialists in the field of oceanic hydrothermal systems.

High-temperature hydrothermal sources were discovered in the late 1970s. At present, more than 100 hydrothermal active and relic fields of the World Ocean have been studied to a variable extent of detail (Rona and Scott, 1993).

Regional investigations (Rona, 1986; Rona and Scott, 1993; etc.) have shown that the majority of hydrothermal ore occurrences are situated within the boundaries of neovolcanic rift zones on the Mid-Atlantic Ridge (TAG, Snake Pit, and Broken Spur) and gravitate to the volcanic arches of these zones. It has been noticed that active hydrothermal sources are most frequently confined to the tectonic disturbance zones. The situation is known when the active hydrothermal field (e.g., Logachev field) is located on the surface of marginal bench of the rift valley, this bench being composed of serpentized ultrabasic rocks (Bogdanov *et al.*, 1995). This situation does not fit well into the existing scheme of hydrothermal system circulation on spreading ridges.

When the map of magmatism of the Central Atlantic was compiled, the idea arose to reflect on it the position of hydrothermal fields as well. Upon their plotting on the map of gravitational anomalies compiled from satellite data (Sandwell and Smith, 1997), we compared the picture obtained with the position of earthquake epicenters (1937-1997). Information on the earthquakes was obtained via the Internet from the catalog of the National Earthquake Information Center (USA). This comparison has revealed the following.

The Logachev Field, recently discovered in the 14°15' N region (Bogdanov, 1995), is situated in the segment of the Mid-Atlantic Ridge between the Cape Verde and Marathon fractures. Analysis of the altimetric map ([Fig. 1a](#)), combined with the earthquake epicenters, has showed that the aseismic region is located precisely in this area. The zone of extensive gravitational anomalies registered as a trench in relief is also located in this area. The anomalies are traced to many hundreds of km east and west of the ridge axis. Note that the three among five well known deepfocus earthquakes in the axial part of the Atlantic Ocean with the epicenter depths of 60, 60, and 51 km and magnitudes 6,7.3, and 4.7, respectively, are connected with the same lineament.

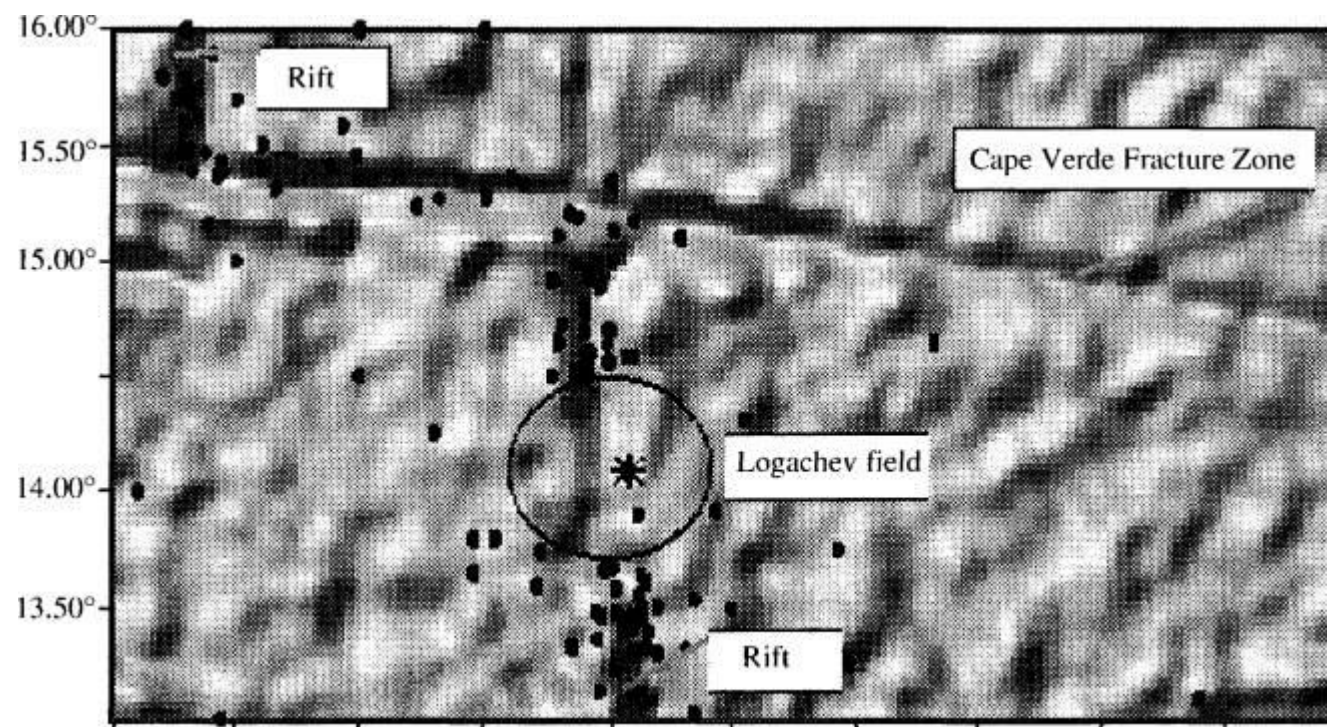


Fig. 1a. Logachev hydrothermal field and earthquakes epicenters position
black dots - epicenters; stars - hydrothermal fields; rings - aseismic gaps

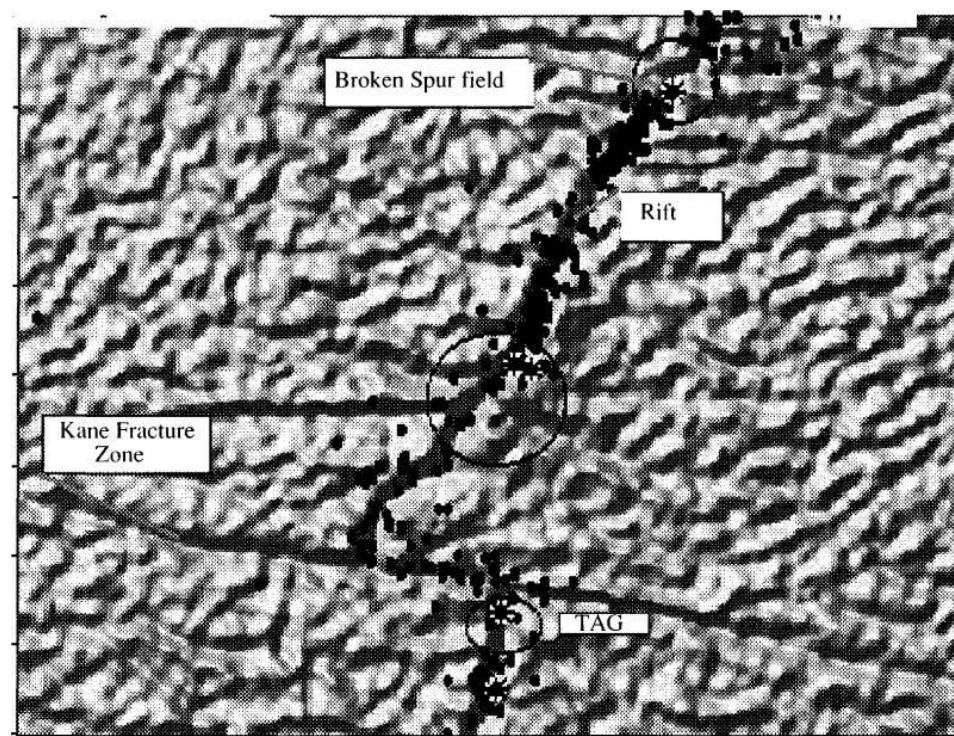


Fig. 1b. Hydrothermal fields and earthquakes epicenters position on Kane FZ region
 black dots - epicenters; stars - hydrothermal fields; rings - aseismic gaps

The TAG, Snake Pit, and Broken Spur hydrothermal fields (Fig. 1b) are also situated either in aseismic zones or near them. The extensive bottom depressions (fractures) are also located near them. Deep-focus earthquakes have not been established in the Kane Fracture Zone. Within the TAG field, hydrothermal edifices were formed either on the surface of intensely crushed basement or within the talus composed of volcanite fragments (Lisitsyn *et al.*, 1990). The well-known hydrothermal plumes (Lukashin *et al.*, 1997) fall into the aseismic zone as well.

The results obtained indicate that hydrothermal fields gravitate to the relatively stable parts of rift zones, which are obviously most favorable for the stable circulation of hydrotherms under the conditions of spreading at low velocities. Such regions are situated in the discontinuity areas.

The general scheme of formation of hydrothermal solutions is well known and reduced to the following. Within the boundaries of rifts,

oceanic water penetrates into the crust via the system of open cracks (gjars) and is heated to near-critical temperatures (over 400°C) due to its interaction with rocks of the oceanic crust and magma chambers. Thereafter, ore-forming hydrothermal solutions enriched in various elements penetrate to the surface and are discharged as "black smokers" and other polymetallic ore occurrences (Lisitsyn *et al.*, 1990; Rona, 1986; Karson and Rona, 1990; etc.). The tectonic position of hydrothermal fields, established by the authors, can refine the existing models.

Open cracks within the rift zone are oriented sub-parallel to its strike. It would be reasonable to suggest that the solutions will migrate not across the rift, as is commonly believed, but in the directions with the best conditions of permeability, i.e., along the rift strike (similar to the fractured reservoirs in oil traps). It is possible that this motion is directed toward the most uplifted parts of the rift valley. In this case, the hydrothermal discharge zones must be situated in the most stable areas, where the favorable conditions for the long-term (up to tens of thousands of years) stable circulation of hydrothermal solutions exist. Such ascending "jets" are situated precisely within the regions with zero or reduced seismicity revealed by the authors. The discontinuities seem to represent the regions with an increased amount of breccias, in other words, with the increased open porosity and permeability ([Fig. 2](#)).

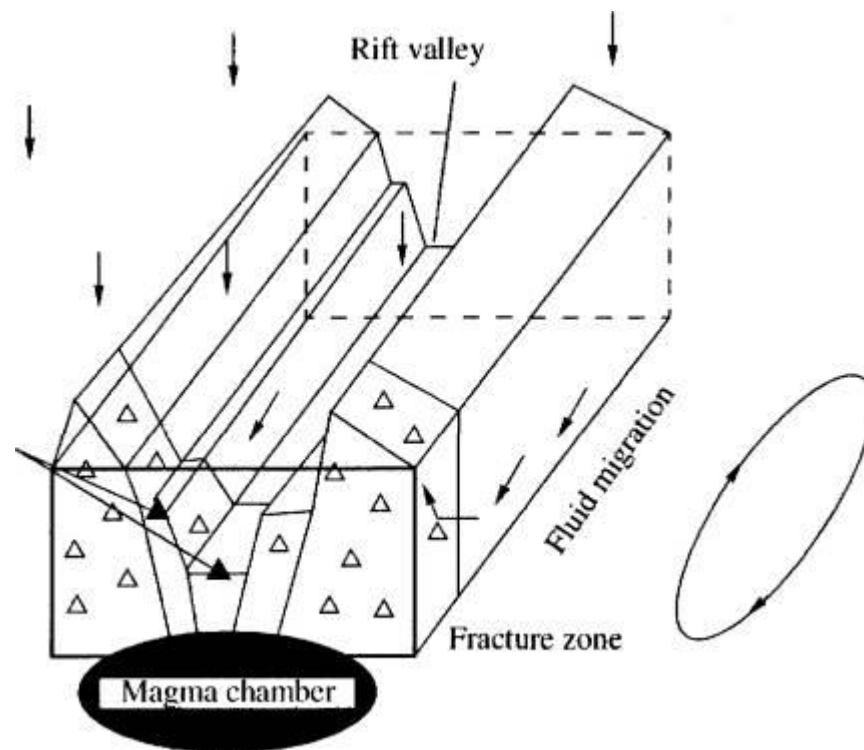
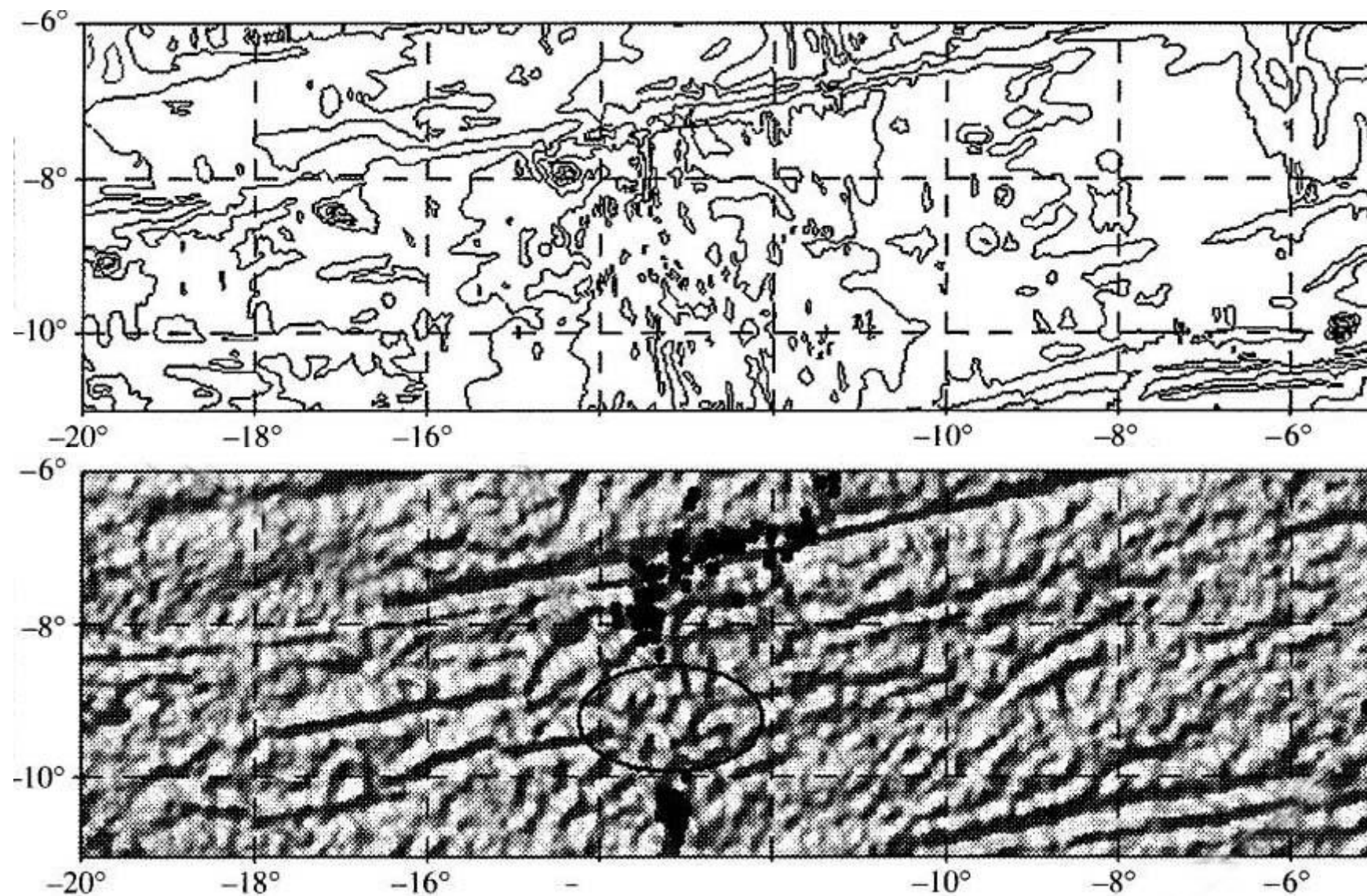


Fig. 2

CONCLUSION

The major circulation of oceanic water and its transformation into ore-forming solutions proceeds along the strike of rift zones with the subsequent discharge in relatively stable areas.

Analysis of the arrangement of earthquake epicenters on the Mid-Atlantic Ridge between 30°N and 15°S shows that there are a number of regions within the specified boundaries (south of the Ascension Fracture Zone and others) with reduced seismicity or altogether without it (Fig. 3), which coincide with the discontinuity areas. We assume these are the most promising areas for the discovery of hydrothermal fields.



**Fig. 3. GEBCO (top) and altimetry maps (bottom) on MAR (11°- 6° S, 20°- 5° W)
black dots - epicenters; ellips - aseismic gaps with hydrothermal field**

REFERENCES

Bogdanov, Yu.A., Sagalevich, A.M., Ashadze, A.M., Chernyaev, E.S., Gurvich, E.G., Lukashin, V.N., Ivanov, G.V., and Peresyppkin, V.I., Hydrothermal Field at 14°45'N of the Mid-Atlantic Ridge // Dokl. Akad. Nauk. 1995. V. 343. no. 3. pp. 353-357 (in Russian).

Karson, J.A. and Rona, P.A., Block-Tilting, Transfer Faults, and Structural Control of Magmatic and Hydrothermal Processes in the TAG Area, Mid-Atlantic Ridge 26°N // Geoi Soc. Am. Bull., 1990. V. 102, no. 12, pp. 1635-1345.

Lisitsyn, A.P., Bogdanov, Yu.A., and Gurvich, E.G., Gidrotermal'nye obrazovaniya riftovykh zon okeana (Hydrothermal Formations in the Oceanic Rift Zones), Moscow: Nauka, 1990 (in Russian).

Lukashin, V.N., Lisitsyn, A.P., Ivanov, G.V., Kravtsov, V.A., and Rusakov, V.Yu., The Study of Hydrothermal Plumes over the MAR Rift Zone in the 29°N Region // Okeanologiya, 1997. VI. 37, no. 5, pp. 770-779 (in Russian).

Rona, P., Hydrothermal Mineralisation at Seafloor Spreading Centers, Amsterdam: Elsevier, 1984. Translated under the title "Gidrotermal 'naya mineralizatsiya oblastei spredinga v okeane", Moscow: Mir, 1986 (in Russian).

Rona, P.A. and Scott, S.D., A Special Issue on Sea-Floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives // Econ., Geoi., 1993. V. 88, no. 8, pp. 1935-1976.

Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // J. Geophys. Res., 1997. V. 102, no. 5, pp. 10039-10054.

[back to top](#)

2001

Litbology and Mineral Resources, Vol. 36, No. 5, 2001, pp. 460-466. Translated from Litologiya i Poleznye iskopaemye. No. 5. 2001, pp. 526-533. Original Russian Text Copyright © 2001 by Mazarovich, Smonov, Peive, Kovyazin, Tret'yakov, Raznitsin, Siivel'eva, Skolotnev, Sokolov, Turko.

Hydrothermal Mineralization in the Sierra Leone Fracture Zone (Central Atlantic Ocean)

A. O. Mazarovich, V. A. Simonov², A. A. Peive, S. V. Kovyazin², G. A. Tret'yakov², Yu. N. Raznitsin, G. N. Savel'eva, S. G. Skolotnev, S. Yu.

Sokolov, and N. N. Turko

**Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (GIN), Pyzhevsky per. 7, Moscow, 1090] 7 Russia
2 United Institute of Geology, Geophysics, and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. pi: Akademika Koptyuga 3,
Novosibirsk 90, 630090 Russia**

Received April 9, 2001

Abstract

The analysis of data on the location of hydrothermal fields, seismicity, and satellite altimetry evidences that in mid-ocean ridges with low spreading velocity hydrothermal fields tend to be grouped in areas with generally low seismic activity and at intersections of discontinuities and rift zones. Based on this assumption, the Sierra Leone Fracture Zone was studied in 2000 during cruise 22 of the R/V Akademik Nikolaj Stra-khov. The study of gabbrodolerite and dolerite showed that sulfide ore minerals in them were formed both by hydrothermal and magmatic processes. The analysis of melt inclusions demonstrated that magmatic complexes formed from a high-temperature (1210-1255°C) low-potassium melt of the N-MORB type. Investigations of fluid inclusions revealed that gabbro and dolerite formed under the influence of an active hydrothermal system at a temperature of 205-226°C. Thus, the Sierra Leone Fracture Zone is considered to be perspective for the discovery of a new hydrothermal field.

The analysis of data on the location of hydrothermal fields, seismicity, and satellite altimetry evidences that hydrothermal fields tend to be grouped in areas with generally low seismic activity and at intersections of discontinuities and rift zones in mid-ocean ridges with low spreading velocity (Mazarovich and Sokolov, 1998). Based on the model considered in this paper, fluids migrate along the rift strike in line with the orientation of fractures. In such a case, places of ore component discharge should be located in the most stable areas of rift zones, where favorable conditions for long-term (up to some tens of thousand years) stable circulation of hydrothermal solutions are available.

The analysis of earthquake epicenter location data (CNSS..., 1997) revealed that the equatorial Atlantic ([Fig. 1](#)) incorporates two regions where earthquakes are not recorded or significantly lower than in the adjoining segments of the Mid-Atlantic Ridge (MAR). The first region is situated in the St. Peter Fracture Zone area (2040/ N), while the second region is located in the Sierra Leone Fracture Zone area (6° N). Both faults have short active segments and can be attributed to discontinuities.

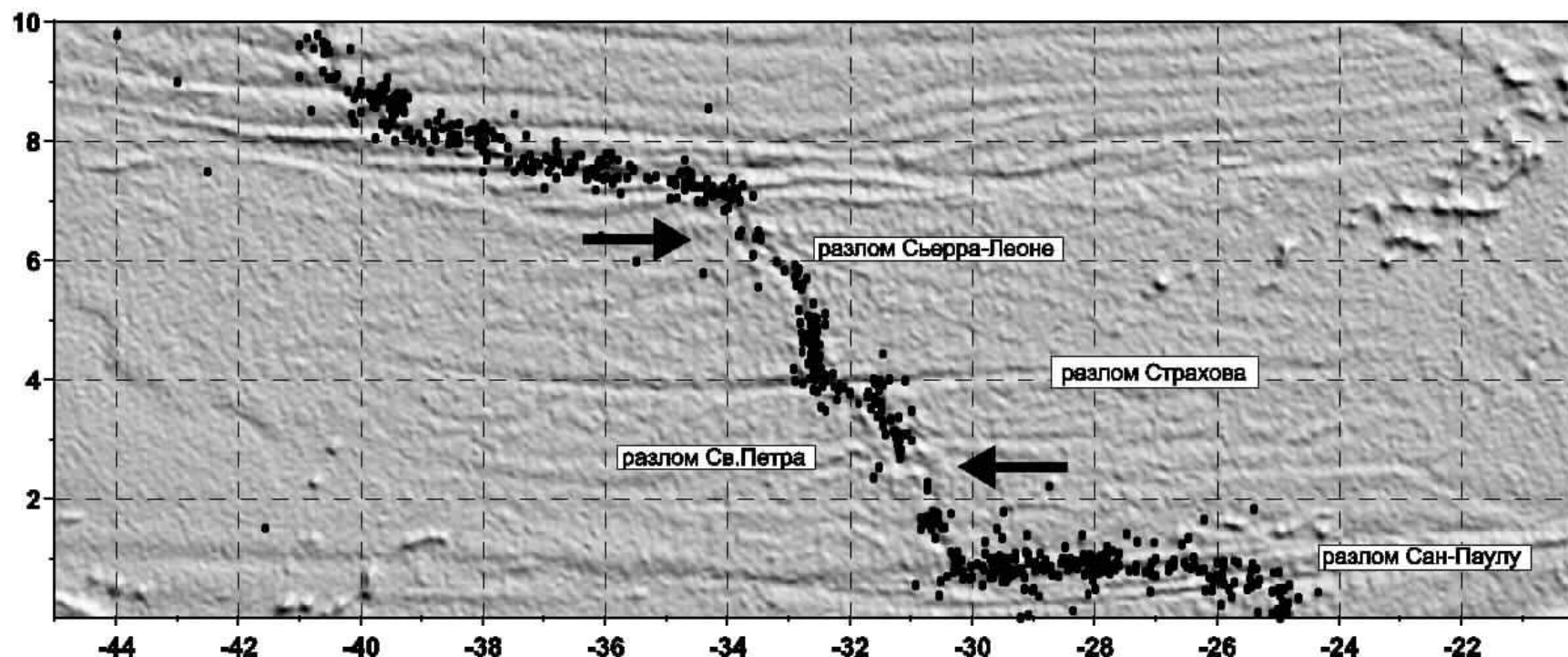


Fig. 1. Distribution of earthquake epicenters (CNSS..., 1977) in Atlantic Ocean equatorial part.

The map is based on satellite altimetry (Sandwell and Smith, 1997). Arrows indicate the areas with lowered seismicity. Latitudes and longitudes are given in degrees up to the decimal place.

We investigated the Sierra Leone Fracture Zone in 2000 during Cruise 22 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov (Peyve et al., 2000). A bathymetric swath survey with the SIMRAD 12S multibeam echosounder and dredging were carried out. They allowed us to detect rocks with hydrothermal alterations and sulfide mineralization.

GEOLOGICAL SETTING OF THE HYDROTHERMALLY ALTERED ROCKS

The MAR rift zone between the Strakhov Fracture Zone (4° N) and 7° 10' N Fracture Zone is divided into three large segments. The southernmost segment located between the Strakhov Fracture Zone and 5°05' N. The almost meridional rift valley developed here has a

straight linear shape. It is bounded by rift mountains complicated by near-latitudinal saddle (Ekvatorial'nyi..., 1997). The dredging recovered here only differently altered basalts. The second segment is located between 5°05' N and 6°5' N. The general strike of the rift zone is 320°. It consists of three isolated intricate depressions. Its western wall is composed of narrow elongated ridges with the meridional strike changing into 320° at 5°05' N. The third segment is a topographically well-expressed rift valley with neovolcanic ridges. The rift structure is disturbed by two large latitudinal fracture zones (6°54' N Zone and Sierra Leone Zone at 6°-6°20' N). Based on the satellite altimetry data (Sandwell and Smith, 1997), both zones are marked by clear linear gravity minima. Ultramafic rocks and gabbroids are widespread on the rift valley walls. Its bottom is composed of fresh pillow basalts.

The area of the intersection of the Sierra Leone Fracture Zone with the rift valley has a very complex structure (Fig. 2). The rift valley consists of two branches separated by a mountain with the minimum depth of 1902 m. We propose to name this mountain "Leonov Mountain" in honor of the late professor Georgii Pavlovich Leonov, Geological Faculty, Moscow State University (see more detail in http://atlantic.tv-sign.ru/names/russian/names_r.html). The eastern branch is a narrow valley with slopes rising up to 750-800 m. It sharply changes the trend from near -meridional valleys to the north the Leonov Mountain. The western branch turns east and can be traced to the south of the Leonov Mountain.

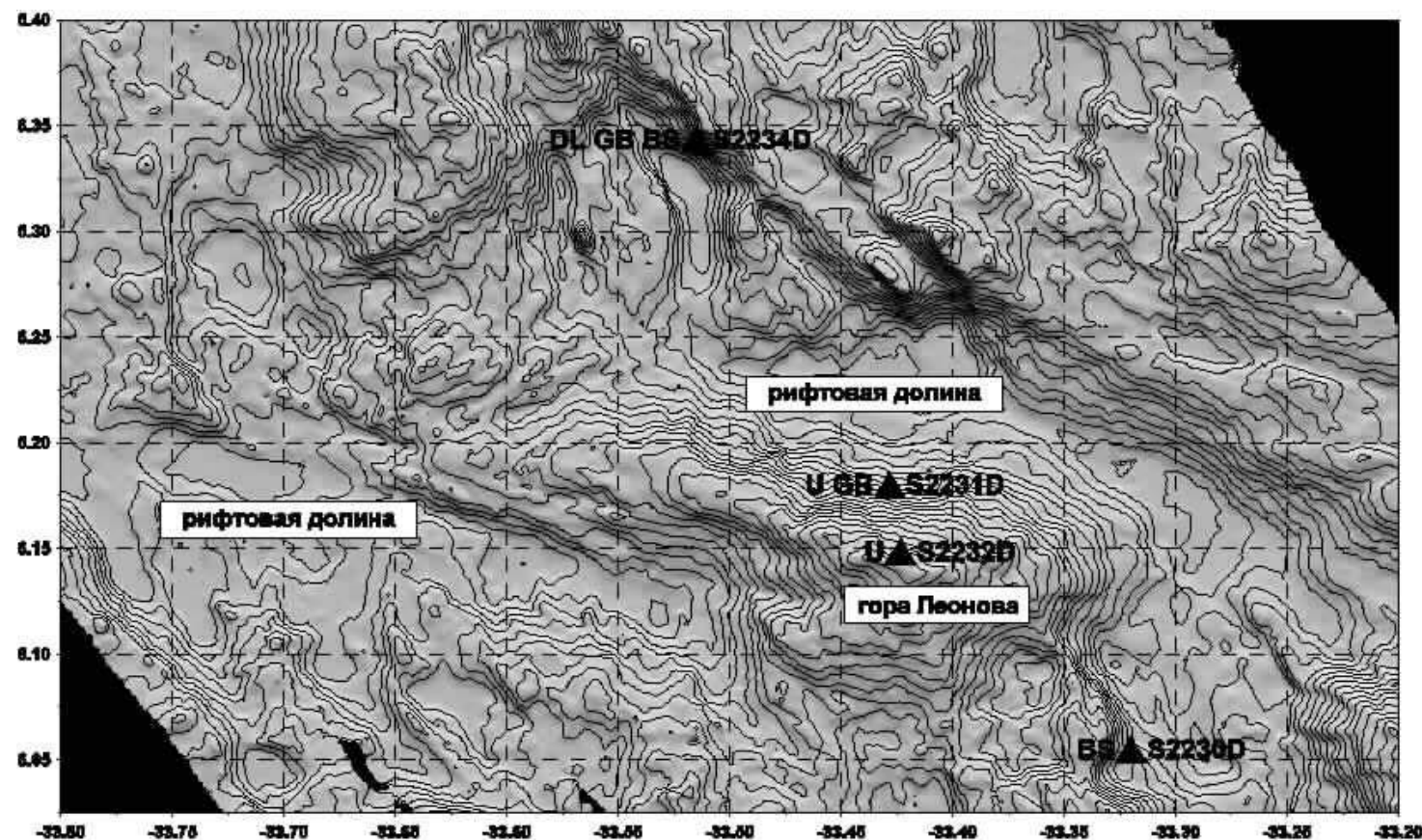


Fig. 2. Seafloor topography at the intersection of the rift valley and Sierra Leone Fracture Zone (100 m contour interval).

Triangles are locations of dredging stations. Stations are numbers given to the right; rocks types, to the left. (BS) Basalts, (U) ultramafic rocks, (GB) gabbro, (DL) dolerites.

During Cruise 22 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov, the dredging was carried out at four stations in the study area considered to be perspective for finding hydrothermal activity, (Fig. 2). Two stations are located on the northeastern slope of the Leonov Mountain (S2231 and S2232); the third station, at the branching of the rift valley (S2234); and the fourth station, in the eastern branch of the rift (S2230). Rocks

with signs of hydrothermal alteration were detected at stations S2231, 2232, and 2234. The material from Station S2234 is of special interest, because it contains abundant sulfide minerals.



Dolerite with sulfides.

Foto - P.Morozzi (IGM CNR, Bologna, Italy)

At stations S2231 and S2232, serpentinized and amphibolized mantle ultramafic rocks prevail. Breccia with ultramafic clasts is also present. Rocks with the predominance of gabbro, gabbrodolerite, and dolerite were dredged at Station S2234. These rocks are fragments of a

dike complex, which is testified by rectilinear quenching contacts between medium-grained gabbro and dolerite with the formation of aphyric basalts. Slickensides and fine zones of foliation develop in dolerite.

Specific features of ore formation in the Sierra Leone Fracture Zone were scrutinized using rock samples from Station S2234. Special attention was paid to doleritic porphyrites containing sulfide mineralization. The rocks are strongly altered, and secondary minerals (amphiboles, chlorites, and others) are widespread. At the same time, porphyritic plagioclases preserved the primary magmatogenic appearance. The thermobar-geochemical analysis revealed fluid inclusions in secondary minerals (amphiboles) and melt inclusions in large porphyritic plagioclases. We obtained convincing information pertaining to physicochemical parameters of the magmatic and hydrothermal systems in the Station S2234 area.

STUDY METHODS. Compositions of sulfides, melt inclusions, and inclusions-hosting minerals were determined using a Camebax-Micro X-Ray analyzer. The melt inclusions were studied in the high-temperature thermo-chamber with an inert medium (Sobolev and Slutskii, 1984). Experiments with the inclusions were executed taking into consideration the recommendations proposed in (Magmatogenfiaya kristallizatsiya..., 1975; Sobolev and Danyushevsky, 1994), as well as on the basis of our own experience (Simonov, 1993). Fluid inclusions were studied with the help of thermometric and cryo-metric methods (Ermakov and Dolgov, 1979; Roedder, 1984) in the medium-temperature chamber and cryo-chamber with an original design (Simonov, 1993). Data on fluid inclusions were processed on a computer using the PETROLOG Program (Danyushevsky, 1998). Thus, we obtained additional information on parameters of the basaltic magma systems.

The analytical study was conducted at the United Institute of Geology, Geophysics, and Mineralogy, Novosibirsk.

PETROGRAPHIC AND MINERALOGICAL FEATURES OF ROCKS. Hydrothermal rocks at stations S2231 and S2232 are mainly represented by carbonate veins in ultramafic rocks often containing vugs and druses of small aragonite crystals. Breccia of serpentinite clasts is of particular interest. It is cemented by carbonate material with overgrowths of druses of elongated small aragonite crystals (up to 5 mm). At Station S2234, the influence of hydrothermal systems on rocks is expressed in the replacement of clinopyroxene by amphiboles (predominantly actinolite) and wide development of sulfides.

Samples of doleritic porphyrites recovered by dredging at Station S2234 were studied in more detail in order to reveal specific features of ore-forming processes in the Sierra Leone Fracture Zone. They contain phenocrysts of rather fresh plagioclase (up to 5 mm in size) and

clinopyroxene replaced by actinolite and chlorite (up to 1 mm). The matrix has predominantly doleritic texture with elongated plagioclase microcrystals (up to 0.5 mm). The studied samples (S2234/22 and S2234/37) are characterized by the presence of numerous aggregates (up to 4 mm) of sulfides, which fill up in some places interstices between small elongated plagioclase crystals in the porphyritic matrix. In other places, sulfides penetrate along fractures in altered (mainly pyroxene) phenocrysts. Sulfides are also developed along borders of large grains. Thus, judging from morphology of these aggregates and their relationship with silicates, one can suggest that sulfides of the first group were formed at the last stages of magmatic processes, and the second group of clearly secondary sulfides, originated as a result of hydrothermal processes. The polygenous nature of sulfides is also proved by their compositions.

The sulfides from interstices between magmatic silicate minerals are characterized by the presence of cubanite, which form disintegration structures together with chalcopyrite. The presence of cubanite, which is typical of high-temperature and magmatic ore deposits (Ramdor, 1962), testifies, first, to sufficiently high temperatures of the formation of these sulfides and, second, to their possible magmatic origin. Not only chalcopyrite but also pyrrhotite is found in association with cubanite. Pyrrhotite most probably is a product of the decay of cubanite at lower temperatures (Ramdor, 1962).

Sulfides from fractures in altered large pyroxene grains are generally represented by pyrrhotite. The development of pyrrhotite along fractures in intensively altered phenocrysts in association with secondary minerals, such as actinolite and chlorite, evidences its hydrothermal origin.

Hence, specific features of the ore mineralization noted above suggest that the sulfides formed under an active influence of both hydrothermal and magma systems. We determined the parameters of solutions and melts based on the study of melt and fluid inclusions.

CHARACTERISTICS OF MELT AND FLUID INCLUSIONS

Melt Inclusions. Primary melt inclusions (5-30 μm in size) were found in plagioclase from doleritic porphyrite (Sample S2234/37). These platy inclusions are arranged as rectilinear zones and bands, which sometimes completely fill up small phenocrysts. Fine-grained light and dark phases predominate in the inclusions. The homogenization temperature of the inclusions is sufficiently high and varies from 1210 to 1255°C. Despite the large scatter in values, one can observe a stable direct correlation between the homogenization temperature and magnesium content. In most cases, the homogenization temperature is in agreement with the liquidus temperature, which was calculated with the use of the PETROLOG Program, within the accuracy of measurements. This indirectly suggests relative dryness of the melts. These data serve as an independent criterion for the validity of results obtained from the study of fluid inclusions.

The analysis of inclusion composition showed that characteristic geochemical parameters of the melts, such as FeO/MgO and TiO² content, practically do not change with temperature decrease. The Fe index (approximately 0.8-1.0) is independent of the Ti content. All these

data suggest the absence of fractionation and the primitive nature of the melt. Taking into consideration very low K concentration in melt inclusions, we can conclude that the gabbrodolerite-forming magma at Station S2234 belongs to the N-MORB type.

Melting parameters of the mantle substratum and primary basaltic magma formation were estimated for rocks from Station S2234 based on melt inclusion data according to the procedure described in (Schilling et al., 1995). It turned out that the melting took place mostly at a depth of 40-80 km and at a temperature of about 1310-1470°C. These results agree with the previously obtained estimates of primary melt generation depths in the MAR (Simonov et al., 1999; Schilling et al., 1995; Shen and Forsyth, 1995). The comparison of physicochemical conditions of magma crystallization with the parameters of primary melts showed that compositions and temperatures of the magma systems, which produce gabbrodolerites, lack any correlations with depths of the generation of primary mantle magma. We can only note some decrease in the Mg content in liquidus melts with increase in the magma generation depth.

The analysis of melt inclusions revealed that magmatic rock associations from Station S2234 formed from low-potassium (probably H₂O-poor) primitive melts of the N-MORB type. Thus, endogenic fluid components of these melts hardly could strongly effect the composition of rock-altering hydrothermal solutions.

Fluid Inclusions. The examination of samples, thin sections, and polished plates of dolerite testifies that a sufficient part of ore mineralization in samples from Station S2234 is most likely related to hydrothermal processes. In other words, hydrothermal solutions, which transformed initial rocks and produced secondary mineral associations, were to a certain extent responsible for the sulfide mineralization.

Amphiboles from Sample S2234/22 contain uniformly distributed and most likely pseudosecondary fluid inclusions, 5-15 μm in size. The flat, slightly faceted inclusions contain a light-colored fluid and a small gas bubble. Experiments carried out in a microcryo-chamber allowed us to establish that the eutectic temperature ranges from -22.7 to -22.9°C, suggesting the predominance in the solution of sodium salts (mainly NaCl) with an admixture of Na₂SO₄ and KCl. The latter crystals dissolve at temperatures ranging from -2.5 to -3.2°C, indicating that the salt concentration is 3.8-5.0 wt %. Measurements in a microthermochamber showed that the inclusions become completely homogeneous at 174-196°C. Taking into account the water-depth at Station S2234 and correction for pressure (350 bar as minimum), the temperature of hydrothermal solutions varies from 205 to 226°C.

The study of fluid inclusions in dolerite-hosted secondary minerals at Station S2234 revealed that active hydrothermal systems with temperatures of 205-226°C are functioning in the area. Solutions of these systems are dominated by NaCl with an admixture of Na₂SO₄ and KCl, and the total salt concentration is 3.8-5.0 wt %. The low salt content and the predominance of sodium compounds indicate that seawater was the source for these hydrothermal solutions. The presence of Na₂SO₄

CONCLUSIONS

(1) Cubanite, chalcopyrite, and pyrrhotite prevail among sulfide ore minerals in gabbrodolerites and dolerites from Station S2234. Specific structural and compositional features of sulfides allow us to suggest the influence of both hydrothermal and magmatic processes on their formation.

(2) Based on melt inclusion data, magmatic associations from Station S2234 formed from high-temperature (1210-1255°C), H₂O-poor, low-K melts of the N-MORB type.

(3) Based on fluid inclusion data, gabbro and dolerite recovered at Station S2234, were situated in the area of an actively operating hydrothermal system with temperatures of 205-226°C. The solutions are dominated by NaCl, and the total salt concentration is 3.8-5.0 wt %. The low salt content and the predominance of Na evidences that seawater was the source of hydrothermal solutions. The presence of Na₂SO₄ in hydrothermal solutions testifies to the active participation of salts in the sulfide formation.

(4) In general, the sulfides studied at Station S2234 have both hydrothermal and magmatic origin. They were most probably formed at the level of subintrusive gabbrodolerites rather than on the ocean floor. Provisionally "dry" melts of the N-MORB type with a minimum water content and low-concentration hydrothermal solutions based on seawater actively participated in the ore formation.

(5) The theoretical assumption of the assignment of hydrothermal systems to areas with lowered seismicity (Mazarovich and Sokolov, 1998) do not contradict the results of geological sampling in the Sierra Leone Fracture Zone and can be accepted as the basis for planning marine expeditions within the discussed topic. The analysis of the detailed bathymetric map with 10-m contour intervals (Fig. 6) shows that the seafloor area at Station S2234, which is located between two branches of the rift, is marked by the presence of many rounded hills (20-30 m high) and mountains (up to 200 m high), which can be interpreted as volcanic edifices of the central type. The similar seafloor topography is fairly typical of areas with black smokers (Bogdanov, 1997). Hence, precisely this region is of primary interest for the detailed prospecting for new ore-forming hydro-thermal systems.

REFERENCES

Bogdanov, Yu.A., *Gidrotermal'nye rudoproyavleniya riftov Sredinno-Atlanticheskogo khrebta* (Hydrothermal Ore Manifestation in Rifts of the Mid-Atlantic Ridge), Moscow: Nauchnyi Mir, 1997. (in Russian)

CNSS Earthquake Composite Catalog, 1997, June. (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>).

Danyushevsky, L.V., The Effect of Small Amount of H₂O on Fractionation of Mid-Ocean Ridge Magmas, Abstr. AGU Spring Meeting, EOS 79, 1998, no. 17, suppl., p. 375.

Ekvatorial'nyi segment Sredinno-Atlanticheskogo khrebta. Prilozhenie k monografii "Ekvatorial'nyi segment Sredinno-Atlanticheskogo khrebta" (Equatorial Segment of the Mid-Atlantic Ridge: Appendix to the Monograph Equatorial Segment of Mid-Ocean Ridge) MOC UNESCO, Vernadsky Inst. Geokhim. Analit. Khim, Ross. Akad. Nauk: ATKAR PKO Kartografiya, 1997. (in Russian)

Ermakov, N.R and Dolgov, Yu.A., Termobarogeokhimiya (Therobarogeochemistry), Moscow: Nedra, 1979. (in Russian)

Magmatogennaya kristallizatsiya po dannym izucheniya vklyuchanii rasplavov (Magmatic Crystallization Based on Melt Inclusion Study Data), Sobolev, V.S. and Kostyuk, V.P., Eds., Novosibirsk: Nauka, 1975. (in Russian)

Mazarovich, A.O. and Sokolov, S.Yu., The Tectonic Position of Hydrothermal Fields on the Mid-Atlantic Ridge, *Litol. Polez. Iskop.*, 1998, no. 4, pp. 436-439. (in Russian)

Peyve, A., Bonatti, E., Brunelli, D., et al.. New Data on Some Major MAR Structures: Preliminary Results of R/V Akademik Nikolaj Strakhov 22 Cruise, InterRidge News, 2000. V. 9, no 2, p. 28.

Ramdohr, P., Die Erzminerale und ihre Verwachsungen, Berlin: Akad. Verlag. 1950. Translated under the title "Rudnye mineraly i ikh srastaniya", Moscow: Inostr. Liter., 1962.

Roedder, E., Fluid Inclusions, Mineral. Soc. Am., 1984.

Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F, Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry, J. Geophys. Res., 1997. V. 102, no. 5, pp. 10039-10054, (<ftp://topex.ucsd.edu/pub/>).

Schilling, J.-G., Ruppel, C., Davis, A.N., McCully, B., Tighe, S.A., Kingsley, R.H., and Lin, J., Thermal Structure of the Mantle Beneath the Equatorial Mid-Atlantic Ridge: Influences from the Spatial Variation of Dredged Basalt Glass Compositions, J. Geophys. Res., 1995. V. 100, no. 7, pp. 10057-10076.

Shen, Y. and Forsyth, D.W., Geochemical Constraints on Initial and Final Depths of Melting Beneath Mid-Ocean Ridges, J. Geophys. Res., 1995. V. 100, no. 2, pp. 2211-2237.

Simonov, V.A., Petrogenезis ofiolitov (termobaro-geokhimicheskie issledovaniya) (Petrogenesis of Ophiolites: Thermobarogeochemical Studies), Novosibirsk: Ob''ed. Inst. Geol. Geokhim. Mineral., Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk, 1993. (in Russian)

Simonov, V.A., Kolobov, V.Yu., and Peive, A.A., Petrologiya i geokhimiya geodinamicheskikh protsessov v Tsentral'noi Atlantike (Petrology and Geochemistry of Geodynamic Processes in the Central Atlantic), Novosibirsk: Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk, 1999. (in Russian)

Sobolev, A.V. and Danyushevsky, L.V., Petrology and Geochemistry of Boninites from the North Termination of the Tonga Trench: Constraints on the Generation Conditions of Primary High-Ca Boninite Magmas, J. Petrol., 1994. V. 35. pp. 1183-1211.

Sobolev, A.V. and Slutskii, A.B., Composition and Crystallization Conditions for the Initial Melt of Siberian Meimechites in

Connection with the Common Problem of Ultramaphic Magmas, Geol. Geofiz., 1984. no. 12, pp. 97-110.

[back to top](#)

2002

Russian Journal of Earth Sciences

Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic Ridge: Setting and prospects of further discoveries

A. O. Mazarovich and S. Yu. Sokolov

Abstract

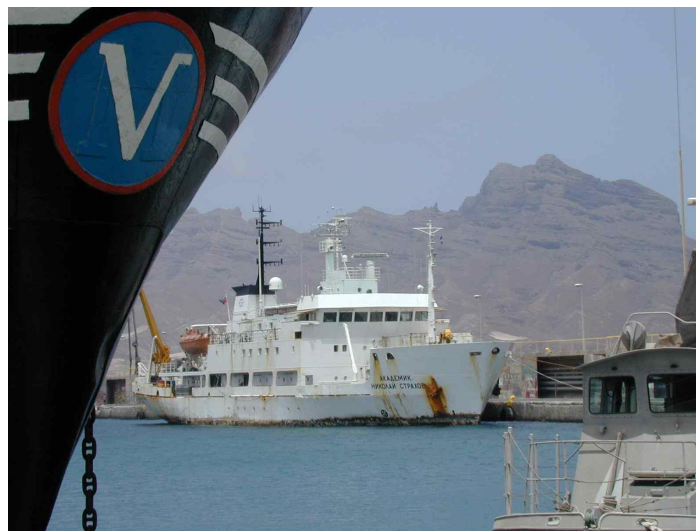
Analyzed is the setting of active and inactive hydrothermal fields and sulfide occurrences on the Mid-Atlantic Ridge between 65°N and 65°S. Multifaceted interpretation of the data has enabled a prediction of how sulfide mineralization is distributed in the Atlantic Ocean.

Introduction

Analyzing the InterRidge database (Hannington, 2001) shows that, by now, 97 active hydrothermal fields have been discovered in all the earth's oceans, including seas. Of the entire population, 15 occurrences fall in the Atlantic basin, 72 in the Pacific, and the rest, in the Indian and Arctic oceans. This study is focused on the Atlantic Ocean alone, between Iceland on the north and the Bouvet triple junction region on the south.

Several years ago, Mazarovich and Sokolov (1998) noted that on the Mid-Atlantic Ridge (MAR), hydrothermal fields gravitate to rift zones with low to zero seismicity (for samples of M 4+ events). In addition, these regions have been shown to contain discontinuities. Our analysis has covered the span between ca. 14°N and 30°N. Based on these two criteria, hydrothermal mineral occurrences may be expected to exist south of 7°N in the Atlantic Ocean.

There, in the summer of 2000, cruise 22 of the R/V Akademik Nikolai Strakhov (GIN RAS) was conducted (Peyve et al., 2000), resulting in the detection of rocks that show hydrothermal alterations and sulfide mineralization.



R/V Akademik Nikolai Strakhov in Mindelo (Cabo Verde), 2000



R/V Akademik Ioffe in Antarktic

The new data have provided the basis for predicting sulfide mineralization for this area (Mazarovich et al., 2001). Based on the prediction just mentioned and on the results of the SIMRAD EM-12 multibeam echo sounder bathymetric survey performed by the R/V Akademik Nikolai Strakhov, this area was re-explored in 2001 by a GIN RAS team headed by S.G. Skolotnev on board the R/V Akademik Ioffe. These studies have yielded further evidence for the presence of sulfides at the predicted locality, as well as in another low seismicity rift segment, the Markov Hole, which is the deepest (4975 m BSL) basin in the MAR rift zone.

The above is weighty evidence that aseismic areas (i.e., those lacking large events and continuous record of small events along the entire length of the ridge) of slow spreading mid-ocean ridges are most favorable for hydrothermal systems to form in, and, hence, for sulfide mineralization. These considerations afford a prediction of localities that hold the greatest potential for sulfide mineralization in the Atlantic Ocean as well.

Our prediction draws on satellite altimetry data (Sandwell and Smith, 1997; Smith and Sandwell, 1997), earthquake epicenter distribution (CNSS., 1997), and a variety of geological data.

Hydrothermal fields and sulfide mineralization: Structural setting in the Atlantic

To date, several active and inactive hydrothermal fields and methane plumes have been detected in the Atlantic Ocean between 14°N and Iceland ([Fig. 1](#)).

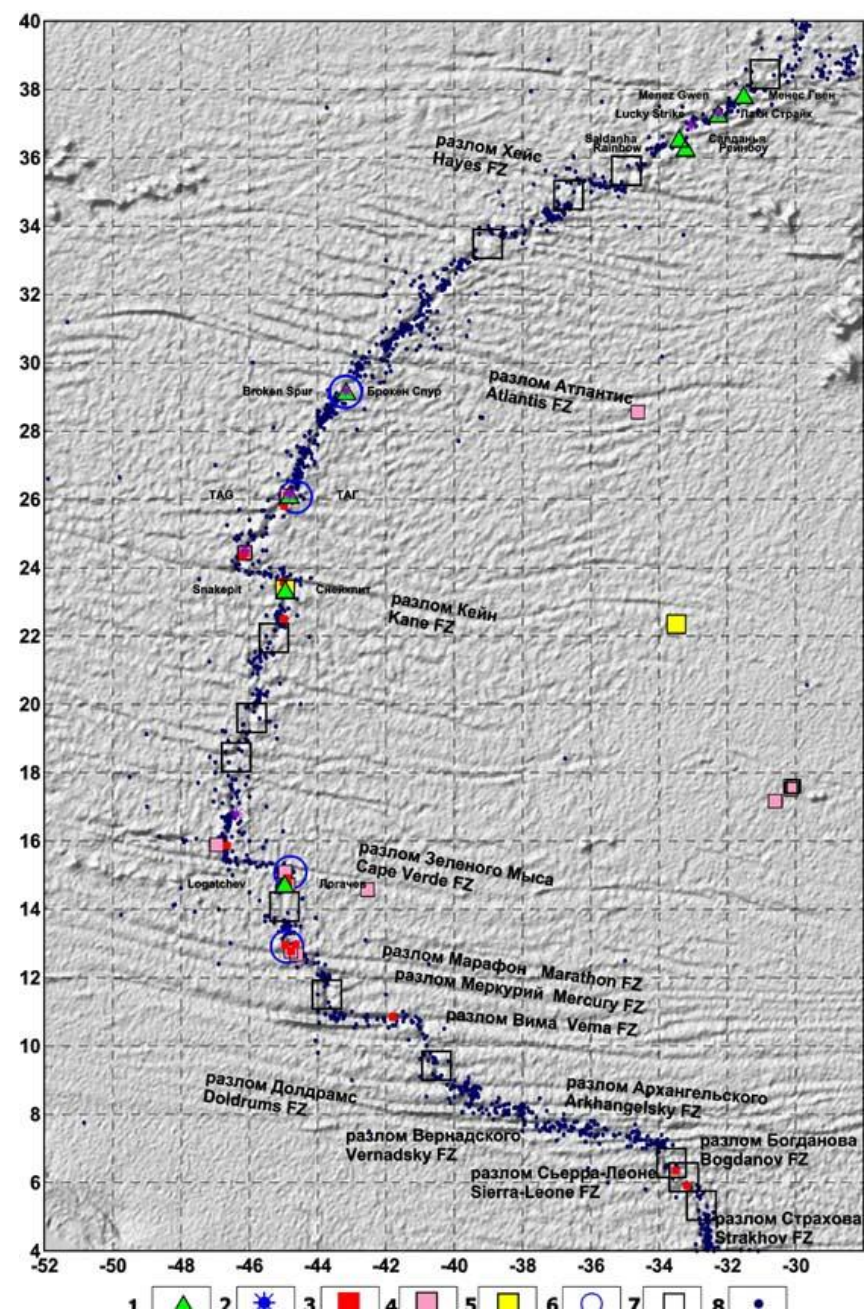


Fig. 1. Location of active and inactive hydrothermal fields and sulfide mineralization in the northern part of the Mid-Atlantic Ridge.

Hereinafter, latitudes and longitudes are given in degrees (to the first decimal place). Topographic base, from satellite altimetry data (Smith and Sandwell, 1997). Earthquake epicenters, from CNSS Earthquake Composite Catalog. 1–2 hydrothermal fields: 1 – active (with proper names) and 2 – inactive; 3 – sulfide mineralization; 4 – hydrothermal alteration; 5 – metalliferous sediments; 6 – methane plume; 7 – area with potential for sulfide mineralization and/or active hydrothermal fields; 8 – earthquake epicenter.

Location of hydrothermal fields

Analyzing the tectonic setting of active hydrothermal fields discerns two principal groups. Group one (Rainbow, Lucky Strike, Reykjanes, etc.) cluster at those segments of the Mid-Atlantic Ridge immediately adjacent to the Azores and Iceland hot spots. These portions of the spreading system are marked by the absence of fracture zones (FZs) with considerable offsets and by smooth topographic relief. Their structural characteristics have been repeatedly discussed in publications (e.g., Almukhamedov et al., 1990)). Group two (Broken Spur, TAG, etc.) are found in that segment of the ridge with major FZs (Atlantis, Kane, Cape Verde) hundreds of kilometers apart and with numerous discontinuities in-between. Water depth above the fields ranges from hundreds of meters (as on the Reykjanes Ridge) to 3650 m (as on the TAG active mound). It is at the bends of rift valleys that black smokers cluster. This can be exemplified by the Broken Spur field ([Fig. 2A](#)). Here, clearly visible are rift valley bends and fractures approaching the valley.

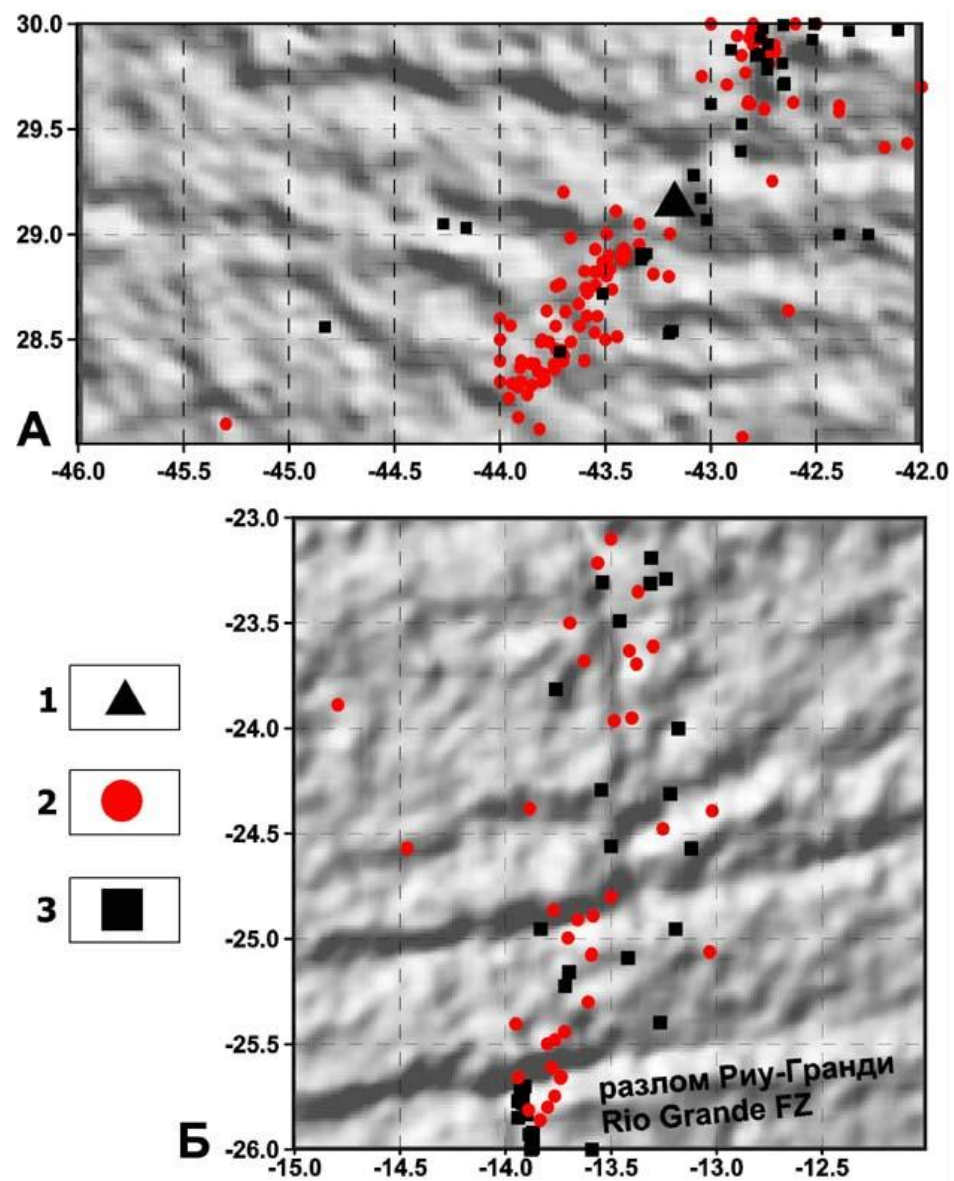


Fig. 2. Relationship of discontinuities and aseismic segments of the Mid-Atlantic Ridge.

A – location of the Broken Spur field. B – study area in the South Atlantic. Earthquake epicenters, from (CNSS..., 1997). Cartographic base, from predicted topography (Smith and Sandwell, 1997). 1 – Broken Spur active hydrothermal field, 2 – earthquake epicenter, 3 – dredge station.

The location of inactive hydrothermal fields coincides with zones of present-day hydrothermal activity, except for the edifices north of Cape Verde FZ and north of Kane FZ. In both cases, however, these are regions that are distinguished by relatively low seismicity. Water depth above the fields ranges from 1700 m (Lucky Strike) to 3900 m (at 24°30'N).

Setting of sulfide mineralization

Sulfide mineralizations of various origins and bedrock zones showing strong hydrothermal imprints have a wider geographic spread, from the Atlantis FZ region to the Bouvet triple junction. The stations that yielded sulfides lie in water depth between 2200 m (Fersman Smt.) and 4800 m (Markov Hole).

Alongside data of common knowledge, Russian and Western publications offer evidence contributing to the InterRidge database on sulfide mineralization and seafloor degassing. This information was acquired by the R/V Antares (cruise 9, dredge 46; 1990), the R/V Akademik Nikolai Strakhov (cruise 7, dredge 71, 1988; cruise 9, dredges 27, 36, 41, 1989; cruise 18, dredge 43, 1994; cruise 22, dredge 34, 2000), the R/V James Gillis (cruise 7309, dredges 58, 93, 1973), the R/V Pillsbury (cruise 7003, dredge 25, 1970), the R/V Geolog Fersman (cruise not specified, dredges 74, 130, 192), the R/V Akademik Ioffe (cruise 10, dredge 32, 2001), the R/V Gelsenzhik (cruise 96, dredge 17, 1996), and the R/V Akademik Kurchatov (cruise 20, the photograph of gas bubbles, 1975).

Sulfides were recovered from various parts of rift valley slopes, from corner highs (Fersman Smt.), transverse ridges (on the west of the active segment of the Romanche FZ), directly from the FZs (Sierra Leone FZ) ([Fig. 3A](#)), and outside present-day rifts (the Bouvet triple junction region and Spiess Ridge). Almost everywhere, sulfide occurrences were found to be associated with tectonization and strong hydrothermal imprints in wallrock and to coincide with low seismicity zones.

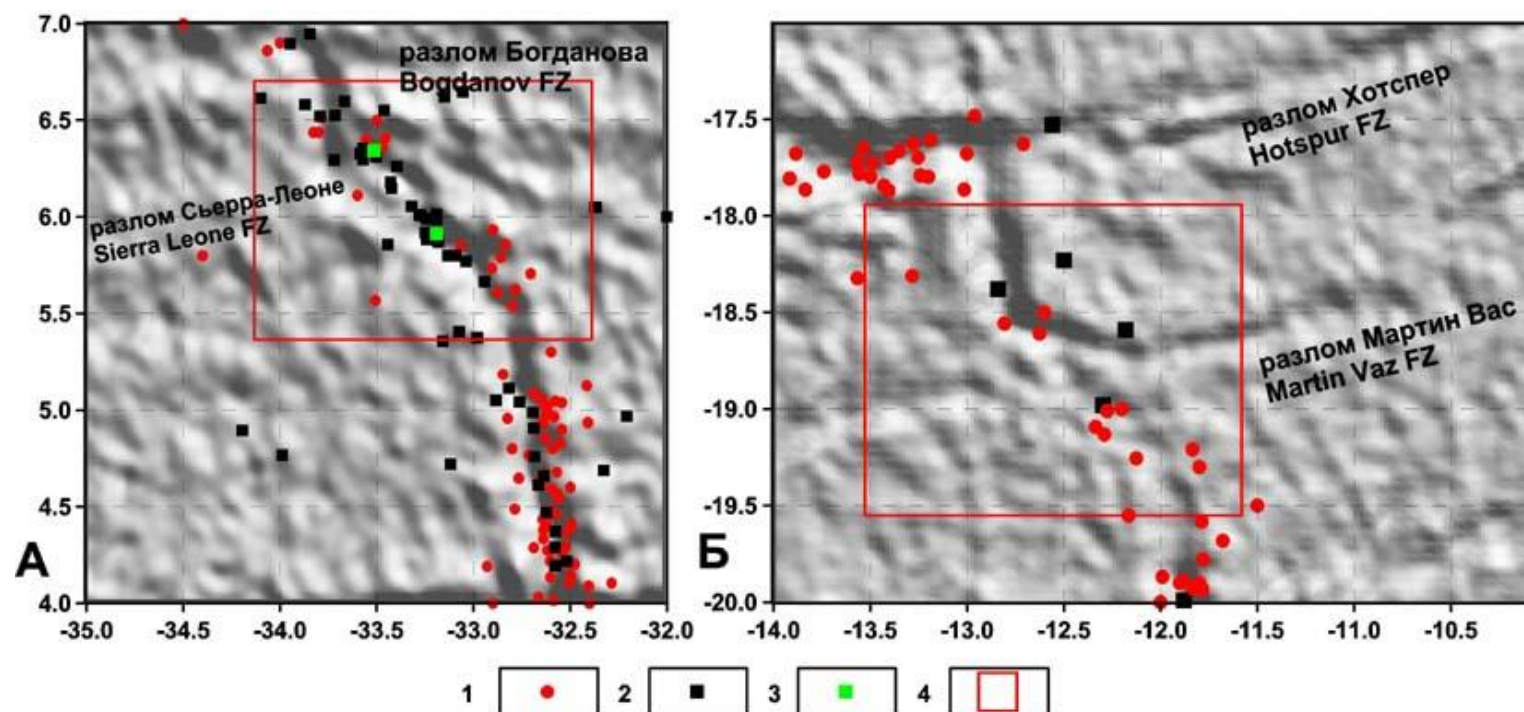


Fig. 3. Location of sulfide mineralization with respect to aseismic segments of the Mid-Atlantic Ridge (Sierra Leone FZ region) (A) and a structurally similar portion of the South Atlantic (B).

Earthquake epicenters, from (CNSS..., 1997). Cartographic base, from predicted topography (Smith and Sandwell, 1997).
 1 – earthquake epicenter, 2 – dredge station, 3 – dredge station with sulfide mineralization; 4 – structurally similar areas.

Likely structural setting of sulfide mineralization in the South Atlantic between the equator and 55°S

In the South Atlantic, only sporadic sulfide occurrences and a unique indication of hydrothermally altered rocks (at 24°S) have been reported (Fig. 4). The Mid-Atlantic Ridge trends roughly NS without major bends or transform offsets. Overlaying earthquake epicenters on altimetry data shows that here, just as in the North Atlantic, aseismic tracts exist, some of them being larger than those in the North Atlantic (south of Ascension I., 52°S) (Fig. 4).

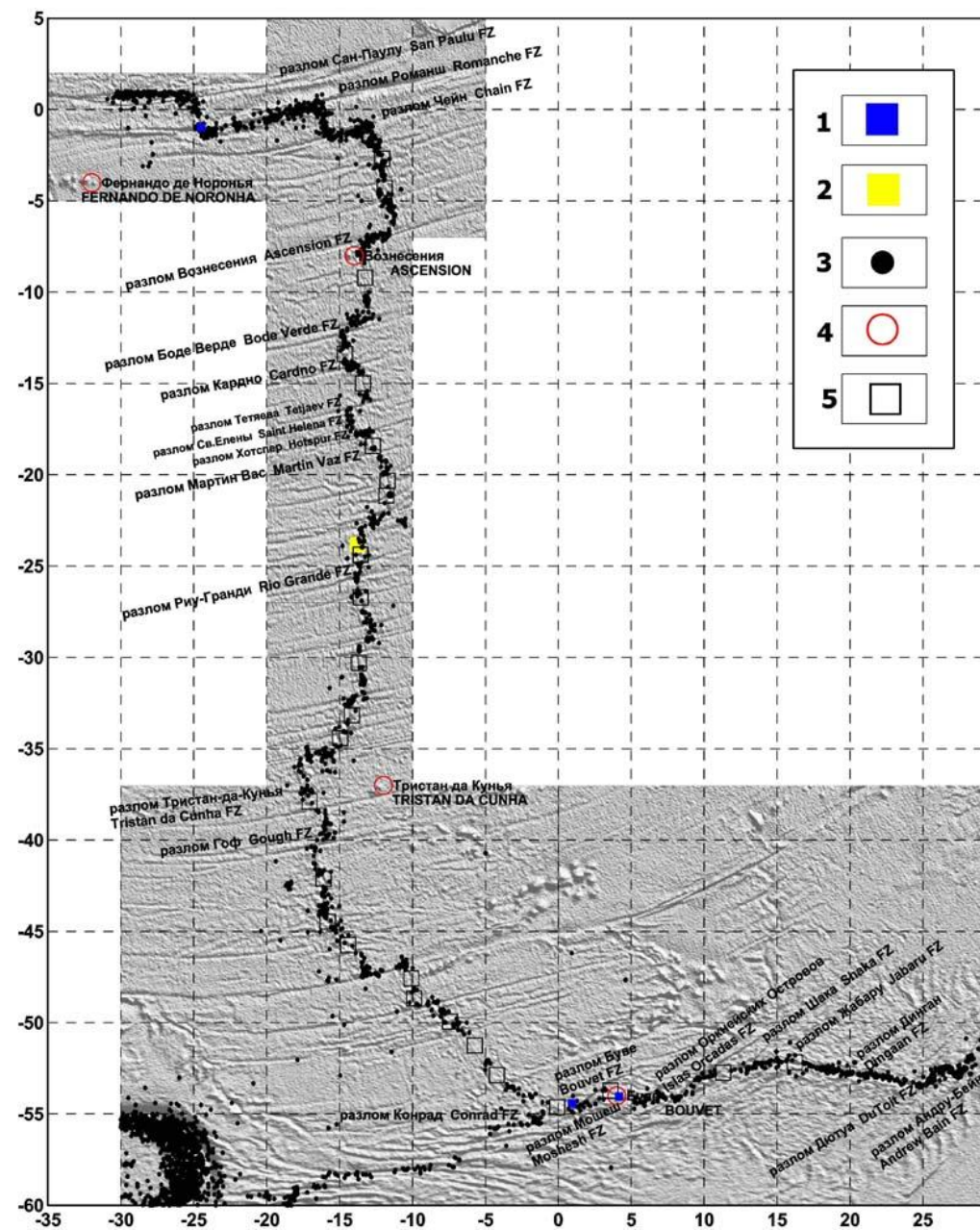


Fig. 4. Map showing predicted sulfide occurrences in the southern part of the Mid-Atlantic Ridge.

Topographic base, from satellite altimetry data (Sandwell and Smith, 1997). Earthquake epicenters, from CNSS Earthquake Composite Catalog.

1 – sulfide mineralization, 2 – hydrothermal alteration, 3 – earthquake epicenter, 4 – hot spot, 5 – area with potential for sulfide mineralization and/or active hydrothermal fields.

Noteworthy is that they can be either related or unrelated to FZs. In view of the considerations discussed in the previous section, it is probably worthwhile to focus on the former. Promising areas like this could be found south of Ascension I. (which is remarkably complex in architecture), between the Martin Vaz and Hotspur FZs, 20°S (Fig. 3B), and at 45°S. Two similar localities exist on the Southwest Indian Ridge (Fig. 4), in the regions of the Shaka and Jabaru FZs.

Of special interest are aseismic zones in the Bouvet triple junction region. As mentioned above, these zones have also yielded sulfide mineralization. One locality is the Spiess Ridge, on which a vast caldera has been mapped. The large Axial Volcano caldera, albeit occurring in a different geodynamic setting (on the Juan de Fuca Ridge), is known to be associated with a major hydrothermal field, currently being studied under the NeMO (New Millennium Observatory) Project (http://newport.pmel.noaa.gov/nemo_cruise98/project.html). Another locality is situated directly near Bouvet Island — in other words, in the vicinity of the Bouvet triple junction hot spot.

Discussion

Over a timespan of more than 100 years, the Mid-Atlantic Ridge has been dredged relatively thoroughly. We do not know the total number of samples obtained, yet the number of stations from which we have data is 4500. Judging from this random sample, the ridge has been studied in a depth range from 5000 m to a few tens of meters. Sampling involved all the principal morphostructures of rift valleys and active segments of the FZs, the percentage of dredge hauls with sulfide mineralization being very low. Thus, of the ca. 850 dredge hauls performed by the R/V Akademik Nikolai Strakhov, only six (0.7%) brought sulfides. This implies that sulfides are not developed in a continuous belt along the entire length of the ridge, but are constrained to within certain nodes.

The nature of aseismic segments of the ridge appears to be critical to unraveling the setting of sulfide mineralization. Most likely, these segments are zones of relatively high heat flow, which is responsible for lithospheric ductility. This is further supported by heat flow data

(Podgornykh and Khutorskoy, 1997). It is from aseismic zones of the MAR axial zone (as, e.g., in the Markov Hole region, at 10°N, and at St. Peter FZ) that elevated heat flow values (>70 mW/m²) have been recorded. Elevated heat flow values, however, have been documented on transverse ridges (Vema FZ) as well. The anomalous nature of these regions is also expressed topographically. Here, rather complexly built nodes exist, whose distinctive feature is large blocks sitting inside fracture zones (e.g., Georgy Leonov Smt. in Sierra Leone FZ; St. Peter FZ; the rift segment between Cape Verde and Marathon FZs), and which were mapped reliably enough using multibeam echo sounders during the R/V Akademik Nikolai Strakhov cruises. Judging from the “predicted topography” data (Smith and Sandwell, 1997), such zones exist in the South Atlantic as well (Figs. 3B, 4).

Let us now discuss the correlation of the data along a profile drawn along the Mid-Atlantic Ridge (Fig. 5). This plot shows generalized information on (i) topographic relief and the free air gravity field, (ii) seismicity, (iii) distribution of sulfide mineralization, (iv) Bouguer anomalies, and (v) seismic tomography. With respect to everything pertaining to sulfide mineralization proper, seismic tomography, seismicity, and gravity anomalies provide a background data set, based on which correlation is performed. This data set enables an internally consistent interpretation of correlative anomalies and those features discernible on the profile. This is detailed below.

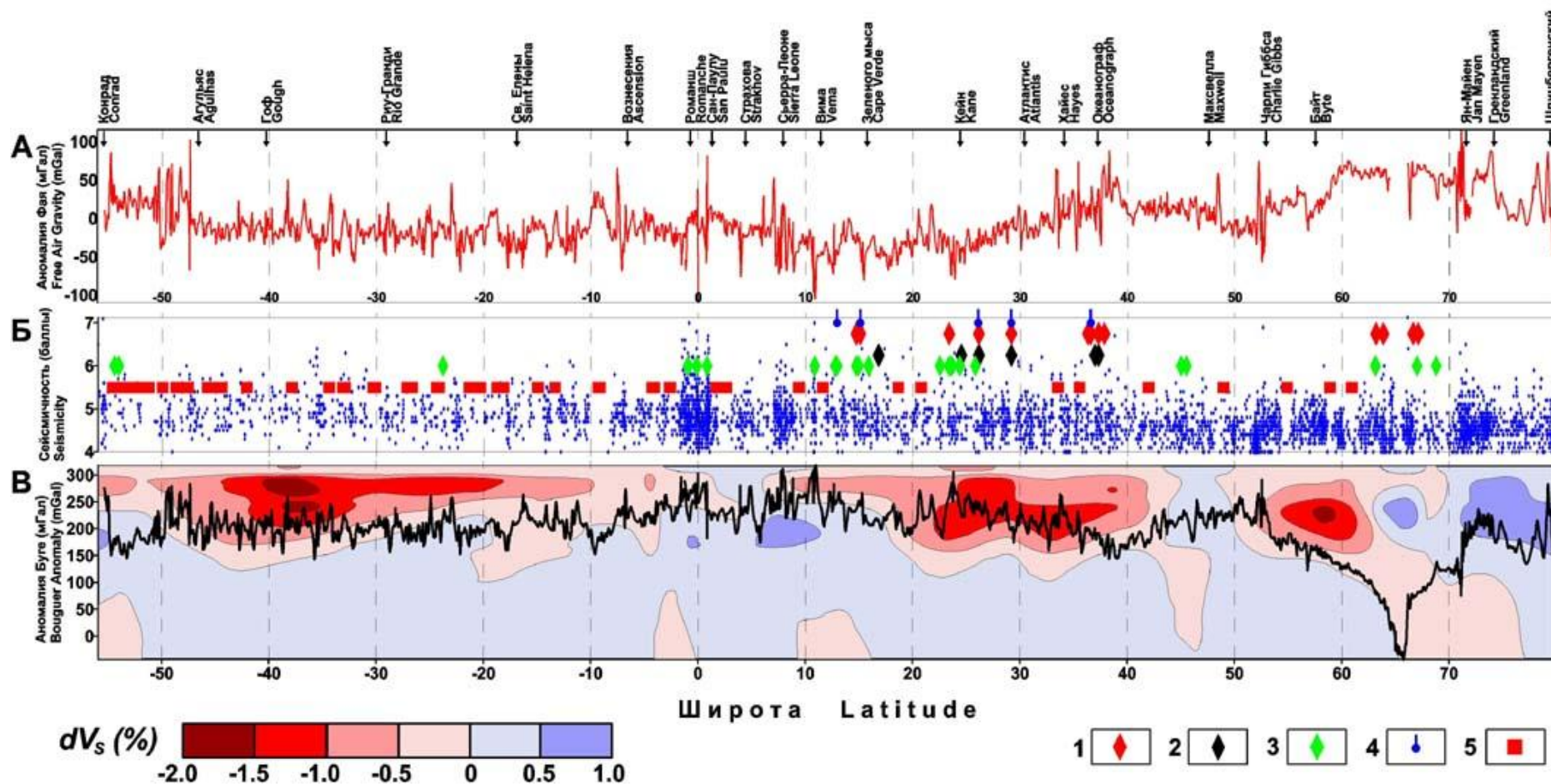


Fig. 5. Correlation of geophysical fields, seismicity, and hydrothermal occurrences along the Mid-Atlantic Ridge:

(A) Free air gravity anomaly from satellite altimetry data (Sandwell and Smith, 1997) and fracture zones intersecting the MAR;
 (B) Seismicity along the MAR (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>), hydrothermal occurrences, and predicted hydrothermal features: 1 – active hydrothermal occurrence, 2 – inactive hydrothermal occurrence, 3 – sulfide mineralization, 4 – methane plume, 5 – area with potential

for sulfide mineralization and hydrothermal activity. (C) S-wave velocity section based on the RG5.5 seismic tomography model (Zhang and Tanimoto, 1992) and the classic Bouguer anomaly.

The seismic tomography pattern obtained from S-wave data best reflects the temperature regime and partially molten state of the mantle (Becker and Boschi, 2002). Our analysis draws on the RG5.5 model (Zhang and Tanimoto, 1992) for spherical harmonics up to the 36th order parametrized on $5^\circ \times 5^\circ$ blocks, in particular, a velocity variation profile along the MAR to a depth of 500 km. This profile shows clearly three minima (Fig. 5C), corresponding (from north to south) to the Iceland, Azores, and South Atlantic plumes. Above these plumes, basaltic magmatism is especially massive (Dmitriev et al., 1999b). In combination with slow spreading, this gives rise to distinct positive anomalies of seafloor topography along the ridge axis, because in these MAR zones basaltic products accumulate appreciably more vigorously than in zones of “background type” magmatism (Dmitriev et al, 2001c). These topographic anomalies induce free air gravity anomalies (Fig. 5A), largely reflecting variations of the most contrasting density discontinuity, the water/seafloor (crust) boundary. Following the classic (2.75 g/cm³ density) Bouguer anomaly scheme, removal of the influence of topography from free air gravity anomalies leaves an anomalous field that is chiefly induced by variations of the Moho, because this is the next most contrasting boundary in the density section near the surface (Fig. 5C). The Bouguer anomaly thus obtained, due to isostatic mechanisms at work, is a mirror image (with respect to free air anomalies) of the topographic anomalies induced by the massive basaltic melts of the plume assemblage. In addition to the Moho influence, this anomaly includes the influence of deeper seated (but less contrasting) density inhomogeneities, whose contributions to the anomalous field we have not separated. On the tomography section, note the match of the principal Bouguer lows and their correlative minima, represented by zones of low density mantle, as well as the marked (ca. 10 arc degrees, or ~1000 km) southward displacement of the Azores and Iceland plumes. Tomographic anomalies are displaced in this manner from Bouguer anomalies because the contribution from deep seated density variations is considerably smaller than that from the Moho. This implies that the region of low density mantle material of the plume is displaced from the relatively massive basaltic melts, marked by gravity anomalies. The above is not at variance with the published data on the southward migration of the Azores plume (Dmitriev et al, 2001b, 2001d; Cannat et al, 1999).

Let us now analyze Fig. 5B, which draws on seismic data (CNSS..., 1997). On Fig. 5, correlation of seismicity with the other geophysical parameters shows that in plume regions, seismic events are more frequent and have lower magnitudes than those in the “cool” mantle region near the equator and in certain fragments to the north. The correlation of seismicity to geophysical and petrologic parameters is detailed in (Dmitriev et al., 1999b). The above does not apply to the reduced frequency of seismic events in the South Atlantic, which is an artifact of the sparser network of recording stations in this part of the world. It is readily apparent that seismicity distribution along the ridge shows

“clusters” ca. 1.5–2 arc degrees across, with the documented sulfide occurrences and other related phenomena gravitating to the spaces between the “clusters.” In discussing the relatively well-understood North Atlantic, it is worth notice that sulfide occurrences gravitate not to zones of strong, not frequent seismic events (for samples of M 4+ events) as such, but to zones associated with plume phenomena in the upper mantle.

In our opinion, the most likely underlying cause of this relationship is that the presence of the plume propagating (or simply functioning) along the ridge gives rise to an additional joint system in the crust, which facilitates water influx and circulation and water enrichment in components typical of hydrothermal solutions. In addition, massive plume-related basaltic magmatism, the supply of essential volatiles in the plume zone, and elevated heat flow, create further conditions to promote hydrothermal activity. Fractured zones also promote serpentinization processes and associated methane production (Charlou et al, 1998; Dmitriev, Bazylev, et al., 1999a; Dmitriev et al, 2001a). It is also observed that active hydrothermal edifices are displaced slightly southward from inactive ones, which may be further evidence for migration of the plume and its related hydrothermal systems. This implies that products of hydrothermal activity, potentially taking place in zones lacking strong seismic events, may be detected not only in the regions of present-day mantle plumes, but also in those areas outside the MAR zone that contain inactive hydrothermal edifices.

Conclusions

Let us summarize the regularities of sulfide distribution along the MAR.

- (1) In the MAR axial zone, active and inactive hydrothermal edifices and sulfide mineralization are not distributed randomly, but are confined to zones of elevated ductility, marked by low seismicity (for samples of 4+ M events).
- (2) In association with these zones, discontinuities are often found that may offer further evidence for the low density (elevated ductility) of the crust of these portions of the MAR.
- (3) In searching for hydrothermal edifices and sulfide mineralization, it is worthwhile to focus, in addition to the above, on plume zones, as detected from seismic tomography data in both the North and South Atlantic.

References

Almukhamedov, A. I., Yu. A. Bogdanov, M. I. Kuzmin, I. M. Sborshchikov, I. V. Khvorova, A. M. Sagalevich, G. M. Anoshin, L. I.

- Barteneva, I. I. Belyaev, S. G. Biryukov, I. V. Kashinskaya, A. V. Komarov, V. M. Kuptsov, M. A. Lisitsina, M. P. Lukashina, A. M. Palkina, M. A. Pal'shin, A. N. Podrazhansky, E. A. Popov, V. A. Popov, N. A. Rimsky-Korsakov, M. V. Rudenko, V. I. Trukhin, and A. A. Shreidno, *Riftovaya zona khrebt Reik'yanes: tektonika, magmatizm, usloviya osadkonakopleniya* (The Rift Zone of the Reykjanes Ridge: Tectonics, Magmatism, and Depositional Conditions), 236 pp., Nauka, Moscow, 1990.
- Becker, T. W., and L. Boschi, A comparison of tomographic and geodynamic mantle models, in *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, G3, 3, January 10, 2002, Paper no. 2001GC000168.
- Bonatti, E., B. M. Guerstein-Honnorez, J. Honnorez, and G. Stern, Hydrothermal pyrite concretions from the Romanche trench (Equatorial Atlantic): metallogenesis in oceanic fracture zones, *Earth Planet Sci. Lett.*, 32, 1, 21–37, 1976.
- Cannat, M., A. Briais, C. Deplus, J. Escarti, J. Georgen, J. Lin, S. Mercouriev, C. Meyzen, M. Muller, G. Pouliquen, A. Rabain, and P. da Silva, Mid-Atlantic Ridge–Azores hotspot interactions: along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173, 257–269, 1999.
- Carrara, G., G. Bortoluzzi, N. Zitellini, E. Bonatti, D. Brunelli, A. Cipriani, P. Fabretti, L. Gasperini, M. Ligi, D. Penitenti, F. Sciute, A. Mazarovich, A. Peyve, N. Turko, S. Skolotnev, and D. Gilod, The Bouvet triple junction region (South Atlantic): A report on two geological expeditions, *Giornale di Geologia*, Ser. 3a, 59/1–2, 19–33, 1997.
- Charlou, J. L., Y. Fouquet, H. Bougault, J. P. Donval, J. Etoubleau, P. Jean-Baptiste, A. Dapoigny, P. Appriou, and P. Rona, Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 13, 2323–2333, 1998.
- CNSS Earthquake Composite Catalog. June 1997 (<http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/>)
- Dmitriev, L. V., B. A. Bazylev, M. V. Borisov, H. Bougault, S. A. Silantiev, and S. Yu Sokolov, The serpentinization of the oceanic mantle peridotites and the Earth fluid regime, European Geophysical Society, 26th General Assembly, *Geoph. Res. Abs.*, 3, 795, 2001.
- Dmitriev, L. V., N. V. Koronovsky, S. Yu., Sokolov, and N. S. Sokolov, Tectonic-magmatic history of the North Atlantic lithosphere formation by the isochron gravity profiling, European Geophysical Society, 26th General Assembly, *Geoph. Res. Abs.*, 3, 818, 2001.
- Dmitriev, L. V., S. A. Silantiev, and S. Yu. Sokolov, Plume and spreading TOR assemblages, spreading rate, ridge segmentation and geophysical fields distribution, European Geophysical Society, 26th General Assembly, *Geoph. Res. Abs.*, 3, 819, 2001.
- Dmitriev, L. V., S. Yu. Sokolov, N. V. Koronovsky, and N. S. Sokolov, Migration of the Azores superplume: Evidence from correlation of petrologic and geophysical parameters, in *Geologiya i geofizika sredinnookeanicheskikh khrebtov. Rossiiskoe otделение InterRidge* (Geology and Geophysics of Mid-Ocean Ridges. InterRidge, Russian Division), 11, May 23–25, 2001.

- Dmitriev, L., B. Bazylev, S. Silantiev, M. Borisov, S. Sokolov, and H. Bougault, Formation of hydrogen and methane during serpentinization of mantle peridotites: Implications for petroleum genesis (in Russian), *Russ. J. Earth Sci.*, 1, 6, 1999.
- Dmitriev, L., S. Sokolov, W. G. Melson, and T. O'Hirn, Plume and spreading basaltic associations and their reflection in petrological and geophysical parameters of Mid Atlantic Ridge northern part (in Russian), *Russ. J. Earth Sci.*, 1, 6, 1999.
- Dubin, E. P., and S. A. Ushakov, *Okeanicheskie riftogenezy (Oceanic Rifting)*, 293 pp., GEOS, Moscow, 2001.
- Hannington, M., *Hydrothermal Vent Database*, InterRidge Databases, 2001 (<http://triton.ori.u-tokyo.ac.jp/~intridge/data1.html>).
- Lukashin, V., A. Lisitsyn, G. Ivanov, V. Kravtsov, and V. Rusakov, A study of hydrothermal plumes above the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge at 29°N (in Russian), *Okeanologiya*, 37, 5, 770–779, 1997.
- Mazarovich, A. O., *Geologicheskoe stroenie Tsentral'noi Atlantiki: razlomy, vulkanicheskie sooruzheniya i deformatsii okeanskogo dna (Geology of the Central Atlantic: Fractures, Volcanic Edifices and Oceanic Bottom Deformations)*, 176 pp., Nauchy Mir, Moscow, 2000.
- Mazarovich, A., and S. Sokolov, Tectonic position of the hydrothermal fields of the Mid-Atlantic Ridge (in Russian), *Litol. Polezn. Iskop.*, 4, 436–439, 1998.
- Mazarovich, A., V. Simonov, A. Peyve, S. Kovyazin, G. Tret'yakov, Yu. Raznitsyn, G. Savelieva, S. Skolotnev, S. Sokolov, and N. Turko, Hydrothermal mineralization in Sierra Leone Fracture Zone (Central Atlantic) (in Russian), *Litol. Polezn. Iskop.*, 5, 1–8, 2001.
- Otchet o 20-m reise nauchno-issledovatel'skogo sudna "Akademik Kurchatov" (geologo-geofizicheskaya ekspeditsiya v Atlanticheskii okean) 29.01–29.05.1975 goda (Report on the R/V Akademik Kurchatov Cruise 20 (A Geologic and Geophysical Expedition in the Atlantic Ocean, Jan. 29 to May 29, 1975), *Inst. Oceanol., USSR Acad. Sci.*, 1975.
- Peyve, A., E. Bonatti, D. Brunelli, A. Chilikov, A. Cipriani, K. Dobrolubova, V. Efimov, S. Erofeev, V. Ferrante, L. Gasperini, R. Hekinian, M. Ligi, G. Maurizio, A. Mazarovich, A. Perfiliev, Y. Raznitsyn, G. Savelieva, B. Sichler, V. Simonov, S. Skolotnev, S. Sokolov, and N. Turko, New data on some major MAR structures: preliminary results of R/V Akademik Nikolaj Strakhov 22 cruise, *InterRidge News*, 9, 2, 28, 2000.
- Podgornykh, L. V., and M. D. Khutorskoy, *Karta planetarnogo teplovogo potoka masshtaba 1:30000000 (Map of the planetary heat flow, scale 1:30 000 000)*, VNIIOkeangeologiya, Moscow–St. Petersburg, 1997.
- Pogrebitsky, Yu., Yu. Goryachev, V. Osipov, and A. Trukhalev, Structure of the oceanic lithosphere: Evidence from the Angola–Brazil geotraverse (in Russian), *Sov. Geol.*, 12, 8–22, 1990.
- Raznitsyn, Yu., S. Skolotnev, N. Turko, A. Mazarovich, A. Peyve, and L. Shterenberg, The junction zone of the Marathon FZ and rift valley: Structure, lithology, and sulfide mineralization (Central Atlantic) (in Russian), *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 320, 4, 952–956, 1991.

Sandwell, D. T., and W. H. F. Smith, Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry, J. Geophys. Res., 102, B5, 10039–10054, 1997.

Sharapov, V. V., and V. A. Simonov (Eds.), Geologicheskie issledovaniya v tsentral'noi Atlantike (Geologic Studies in the Central Atlantic), 192 pp., IGI SOAN SSSR, Novosibirsk, 1991.

Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, 277, 5334, Sept. 26, 1997.

Trukhalev, A. I., P. V. Vorob'ev, T. V. Stepanova, and M. A. Stepanov, Certain tectonic and magmatic characteristics of the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge at 24°N and 25°N, in Gidrotermal'nye sistemy i osadochnye formatsii sredinno-okeanicheskikh khrebtov Atlantiki (Hydrothermal Systems and Sedimentary Assemblages of Mid-ocean Ridges of the Atlantic), pp. 72–112, Nauka, Moscow, 1993.

Zhang, Y. S., and T. Tanimoto, Ridges, hotspots and their interaction, as observed in seismic velocity maps, Nature, 355, 45–49, 1992.

[back to top](#)