

УДК 552.2(263)

## ГЕОЛОГИЯ РУДОВМЕЩАЮЩИХ РИФТОВЫХ ВПАДИН В РАЙОНЕ РАЗЛОМА СЬЕРРА-ЛЕОНЕ В ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АТЛАНТИКЕ

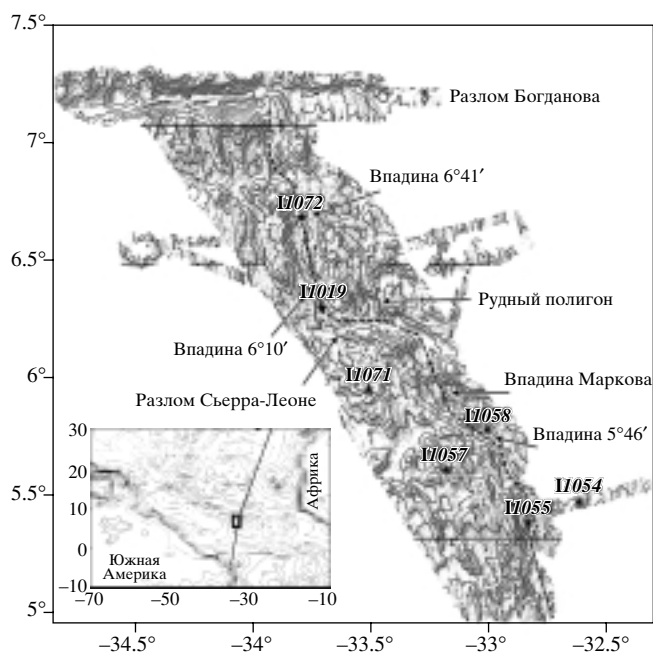
© 2003 г. С. Г. Сколотнев, А. А. Пейве, Н. С. Бортников,  
Г. Н. Савельева, В. А. Симонов, Е. В. Шарков, Н. В. Цуканов,  
Н. Н. Турко, Т. А. Демидова, Д. И. Кринов, А. В. Матюшенко,  
А. Г. Мочалов, О. И. Окина

Представлено академиком Ю.М. Пушаровским 02.04.2003 г.

Поступило 04.04.2003 г.

В проблеме поиска рудных залежей сульфидных массивных руд на океанском дне все большее значение приобретает задача типизации тех геологических обстановок, где встречаются рудопроявления, возникшие в районах разгрузки высокотемпературных гидротермальных флюидов. Одним из таких районов, где образование подобных руд было предварительно предсказано [1], является гребневая часть Срединно-Атлантического хребта (САХ) в районе разлома Сьерра-Леоне в Приэкваториальной Атлантике. В этом районе была выполнена детальная батиметрическая съемка, изучено строение осадочного чехла и проведены многочисленные драгировочные работы, поставившие обильный каменный материал (22-й рейс нис “Академик Николай Страхов” и 10-й рейс нис “Академик Иоффе”). Результаты этих работ уже опубликованы в ряде работ [2–6]. В данной работе рассматривается геология рудовмещающих структур с целью выявления тех особенностей их геологического строения, которые могут быть ответственны за формирование рудных залежей. Такие детальные геологические исследования предприняты во второй половине 10-го рейса нис “Академик Иоффе” по плану работ в рамках проектов Президиума РАН на 2002 г. по секции Наук о Земле: “Геология, гидротермы,

геодинамика Приэкваториальной Атлантики” (ГИН РАН, научный руководитель акад. Ю.М. Пушаровский) и “Океанические рудно-магматические системы: условия минералообразования, источники металлов и флюида, перспективы освоения” (ИГЕМ РАН, научный руководитель Н.С. Бортников). Участки, где проводились детальные рабо-



**Рис. 1.** Местоположение рифтовых впадин. В качестве основы использована карта оттененного рельефа, выполненная по результатам батиметрической съемки (авторы А.О. Мазарович и др. [5]). Штриховой линией показана ось рифтовой зоны, звездочками – местоположение станций драгирования во второй половине 10-го рейса нис “Академик Иоффе” и ст. I1019 (первая половина 10-го рейса нис “Академик Иоффе”). На врезке – положение полигона в Атлантическом океане.

Геологический институт  
Российской Академии наук, Москва  
Институт геологии рудных месторождений,  
минералогии, петрографии и геохимии  
Российской Академии наук, Москва  
Объединенный институт геологии,  
геофизики и минералогии  
Сибирского отделения,  
Российской Академии наук, Новосибирск  
Институт океанологии им. П.П. Щиршова  
Российской Академии наук, Москва

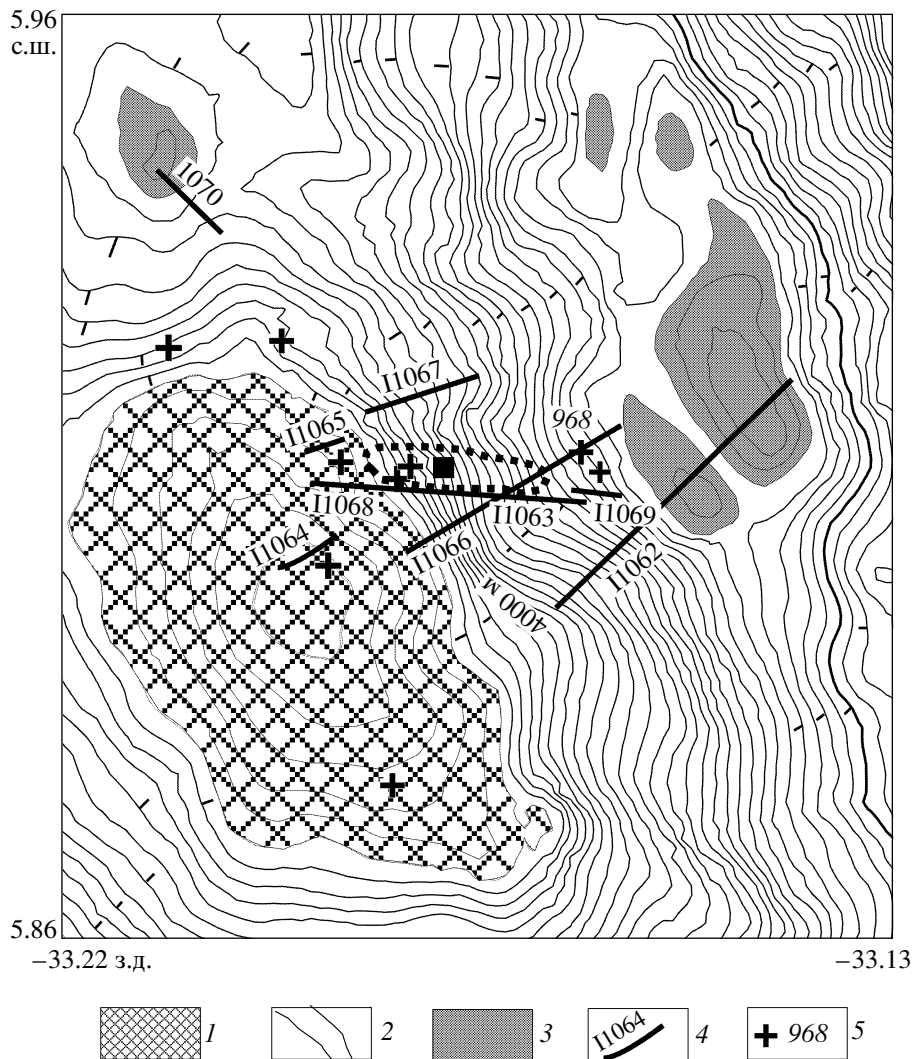
**Таблица 1.** Станции драгирования второй половины 10-го рейса нис “Академик Иоффе”

№ ст.	Интервал драгирования				Глубина, м		Породы	Масса, кг
	начальная		конечная		макс.	мин.		
	широта	долгота	широта	долгота				
I1054	05°28.7'	-32°37.2'	05°28.2'	-32°38.5'	2950	2380	Ультрабазиты 100%	0.3
I1055	05 23.0	-32 50.1	05 23.0	-32 51.1	3880	3100	Базальты 100%	45.0
I1057	05 36.1	-33 12.0	05 36.8	-33 11.3	2850	2800	Базальты, гиалокластитовые брекчии 100%	4.0
I1058	05 46.3	-33 01.7	05 46.9	-33 00.9	4580	4400	Глина	
I1060	05 50.7	-33 13.6	05 50.1	-33 14.0	3600	3240	Габбро, плагиограниты, метаморфические сланцы по габбро 60%; ультрабазиты 10%; базальты 30%, хлорит-сепрентин-талковые сланцы	60.0
I1061	05 50.4	-33 17.4	05 50.0	-33 17.9	3000	2700	Габбро (1 обр.); ультрабазиты (1 обр.)	0.1
I1063	05 54.5	-33 10.0	05 54.7	-33 09.6	3900	3600	Габбро 75%; ультрабазиты 25%	30.0
I1064	05 54.3	-33 11.8	05 54.4	-33 11.4	4850	4750	Ультрабазиты 97%; базальты 3% (1 обр.)	0.3
I1065	05 54.8	-33 11.2	05 54.8	-33 10.9	4650	4400	Глина	
I1068	05 54.7	-33 11.3	05 54.6	-33 10.1	4680	4020	Габбро 35%; ультрабазиты 30%; базальты 35%	50.0
I1069	05 54.6	-33 09.8	05 54.5	-33 09.5	3800	3640	Габбро, милониты и метаморфические сланцы по габбро 94%; ультрабазиты 3%; базальты 3%	150.0
I1071	05 57.2	-33 31.0	05 56.6	-33 31.6	2800	2200	Ультрабазиты 50% (1 обр.); плагиограниты 50% (1 обр.)	5.0
I1072	06 40.6	-33 49.3	06 40.6	-33 48.0	4350	4200	Базальты 100%	30.0

ты, показаны на рис. 1, координаты станций драгирования и краткая характеристика драгированного каменного материала представлены в табл. 1.

Исследуемый район находится непосредственно к югу от трансформного разлома Богданова и приурочен к промежуточной зоне между двумя сегментами САХ, резко отличающимися по своему строению друг от друга. К северу от этой зоны САХ имеет типичное для медленно-спрединговых хребтов строение, когда рифтовая долина расчленена многочисленными трансформными разломами. К югу от этой зоны гребневая часть хребта представляет собой плато, рассеченное в осевой зоне рифтовой долиной. На изученном полигоне рифтовая долина отчетливо выражена. В самом общем виде это глубокая депрессия, располагающаяся в осевой части в целом наиболее приподнятого участка океанского дна. К ней приурочены наиболее свежие базальты, которые слагают ее днище, борта и неовулканические поднятия, связанные с рифтовой долиной. Как показано в работах [5, 6], на данном участке САХ рифтовая долина на различных сегментах имеет разное простирание и разбивается на отдельные отрезки, которые смещаются друг относительно друга, но не по трансформным разломам, а вдоль левосторонних сдвигов. Наиболее крупным левосторонним сдвигом в этом районе является разлом Сьерра-Леоне.

Рифтовая зона состоит из протяженных депрессий и отдельных относительно изометричных рифтовых впадин. Самая глубокая рифтовая впадина Маркова имеет глубину около 5000 м (рис. 1). С восточного борта этой впадины были получены при драгировании массивные сульфидные руды (6° с.ш.) [3]. Тонкие железо-марганцевые корочки на поверхности пород из этой впадины обогащены медью, цинком и двухвалентным марганцем [7]. Впадина Маркова располагается непосредственно к югу от разлома Сьерра-Леоне. Поперечным поднятием она отделена от более южной рифтовой впадины, располагающейся на широте 5°46' с.ш. В тяжелой фракции донных илов, поднятых со дна впадины 5°46' с.ш., содержатся сульфиды и гидроксиды меди, подобные тем, которые встречены в зонах разгрузки высокотемпературных гидротермальных флюидов, а железо-марганцевые корочки на поверхности пород из этой впадины обогащены никелем. Эти признаки могут указывать на то, что впадина 5°46' является потенциально рудоносной. Вкрапленные и прожилковые сульфидные руды, связанные с измененными базальтами и долеритами, также обнаружены в районе так называемого Рудного полигона [2, 8], находящегося непосредственно к северу от разлома Сьерра-Леоне (рис. 1). В его пределах имеется ряд непротяженных клиновидных рифтовых впадин, представляющих собой, по-видимому, рифт-пропагатор.



**Рис. 2.** Схема опробования впадины Маркова. 1 – днище впадины; 2 – горизонтали рельефа, проведенные через 100 м; 3 – поднятия, осложняющие борта впадины; 4 – треки станций драгирования и их номера; 5 – местоположение станций, на которых изучалась термохалинная структура морской воды и отбирались пробы воды (поставлен номер ст. 968). Черным квадратом показано положение станции драгирования П1032, на которой были подняты массивные сульфиды. Оконтурено место, перспективное для дальнейших поисков массивной сульфидной руды.

Три перечисленные рудовмещающие структуры имеют целый ряд общих особенностей геологического строения. Как следует из результатов сейсмоакустического профилирования при помощи профилографа “Парасаунд”, их днище засыпано осадками, мощность которых достигает 40 м. Драгировочные работы показали, что и на бортах этих впадин широко развиты осадки. Из коренных пород на бортах наиболее широко развиты габброиды, в меньшей степени – ультраосновные породы и в крайне незначительном количестве долериты и базальты. Базальты представлены либо свежими разновидностями с непалагонитизированным закалочным стеклом, либо сильно гидротермально измененными породами. Также широким распространением пользуются метаморфиче-

ские породы, развитые по габброидам в условиях стрессового метаморфизма. Они представлены амфиболитами, милонитами и катаклазитами. Так, в наиболее хорошо изученной впадине Маркова (рис. 2, табл. 1) процентное соотношение среди драгированного каменного материала следующее: габброиды и метаморфиты, образованные по ним – 52%, ультрабазиты – 36%, базальты – 11%, плагииграниты – 1%. Многие метаморфические породы сильно гидротермально изменены и превращены в пренит-эпидот-хлорит-амфиболовые метасоматиты. Халькопиритовые массивные руды во впадине Маркова, полученные на ст. 1032, замещают аналогичные метасоматиты, а также образуют в них прожилки и вкрапления. Вблизи того места, где была обнаружена руда, но

на другой станции (1069), подняты и безрудные метасоматиты.

Среди габброидов, слагающих рудовмещающие структуры, присутствует широкий спектр разновидностей. Относительно большой объем составляют оливиновые разности, в том числе троктолиты, широко распространены полосчатые габброиды и изотропное габбро. Очень важно, что во впадине Маркова внутри габброидов нередко наблюдаются жилы плагиогранитов. Плагиограниты встречены также в виде самостоятельных образцов, содержащих включения габброидов размером до 6 см в поперечнике.

Как показывают результаты вещественного изучения базальтов (С.Г. Сколотнев и др., в печати), их совокупность, характеризующая каждую из рудовмещающих структур, образует протяженную дифференцированную серию. Среди них помимо преобладающих деплетированных разностей встречаются также обогащенные базальты *T*- и *P*-типов MORB.

Детальные работы, проведенные во впадине Маркова, показали, что коренные породы обнажены на ее бортах в очень узких зонах в окружении осадков. Одна из таких зон оконтурена драгировочными работами в виде площади, ограниченной координатами  $5.908^{\circ}$ – $5.914^{\circ}$  с.ш. и  $33.158^{\circ}$ – $33.172^{\circ}$  з.д. (рис. 2). К этой площади приурочены находки руды, метасоматитов и метаморфических пород; она является первоочередным объектом для постановки детальных работ с целью локализации рудной залежи.

Борта некоторых рудовмещающих рифтовых впадин осложнены продольными хребтами разных размеров. Морфологически они похожи на неовулканические поднятия. Однако они сложены в основном габброидами и метаморфитами (ст. 1060, 1061, 1063, 1069), что указывает на их тектоническую природу. В целом простирание рудовмещающих впадин и их отдельных структур отклонены от общего простирания того отрезка рифтовой долины, где они размещены, в направлении против часовой стрелки.

Для сравнения с рудовмещающими рифтовыми впадинами были изучены две рифтовые впадины к северу от разлома Сьерра-Леоне –  $6^{\circ}10'$  (ст. 1019) и  $6^{\circ}41'$  (ст. 2238–2240, 1072). Их простирание не отличается от простирания самой рифтовой долины. Днище этих впадин сложено базальтами, а на бортах наряду с базальтами в небольшом количестве развиты габброиды. Среди габброидов доминируют оливиновые разности, базальты представлены лишь слабо дифференцированными высокомагнезиальными деплетированными разностями.

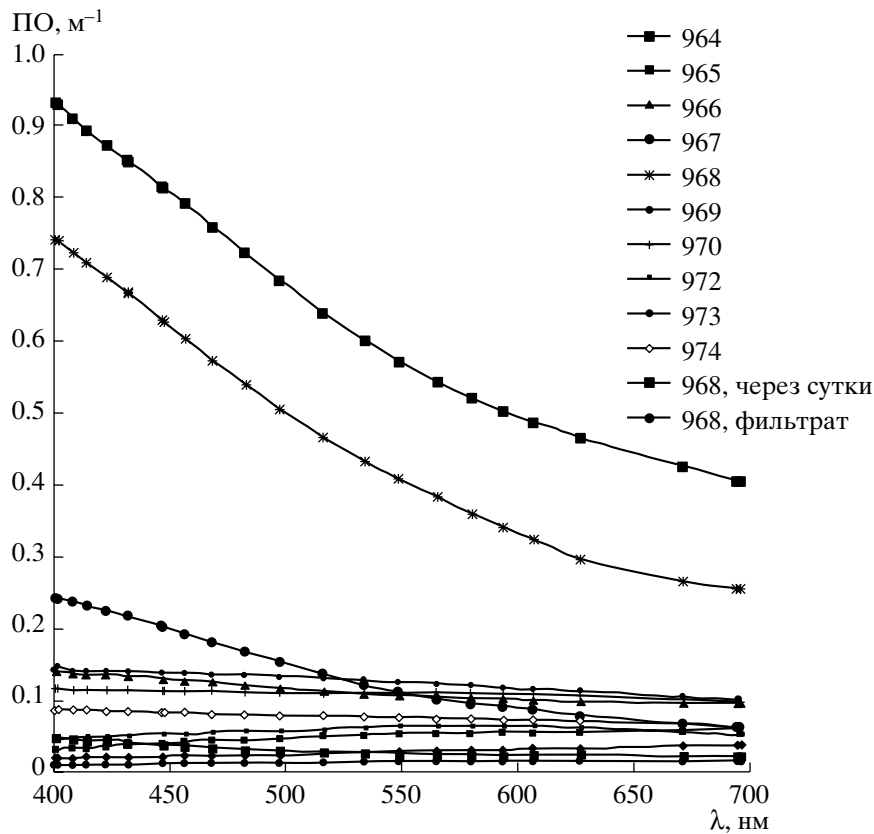
Во второй половине 10-го рейса нис “Академик Иоффе” над тремя рифтовыми впадинами – Маркова,  $5^{\circ}46'$  и  $6^{\circ}41'$  была изучена термохалин-

ная структура морской воды. Полные результаты этих исследований будут опубликованы позднее. Однако один из результатов этой работы имеет прямое геологическое значение. Температура придонного слоя морской воды над рудовмещающими впадинами оказалась заметно выше, чем над более северной впадиной –  $6^{\circ}41'$ .

Суммируя, можно следующим образом описать геологическое строение наиболее изученной впадины Маркова. Ее днище и нижние участки бортов засыпаны осадками, мощность которых заметно больше в районе днища впадины. Коренные породы обнажаются в узких зонах на бортах впадины и представлены по преимуществу габброидами. Судя по широкому распространению метаморфических пород, сформировавшихся в условиях стресса, эти узкие зоны представляют собой выходы на поверхность дна плоскостей глубинных срывов, по которым глубинные породы были выведены на поверхность дна. По-видимому, структуры, осложняющие борта впадины, сложены именно этими глубинными породами. Тектурно-структурные соотношения сульфидов и метасоматических пород показывают, что прожилково-вкрапленные и массивные сульфидные руды образовались при метасоматическом замещении пород или выполнении трещин в океанической коре ниже поверхности дна, вероятно, в зонах разломов, когда минералообразующий флюид поднимался по мелким трещинам. На поверхность океанского дна они были выведены в результате тектонических движений вдоль плоскостей глубинных срывов.

Возможно, что драгированные образцы представляют собой фрагменты прожилково-вкрапленной зоны, которая образуется вокруг канала, вдоль которого высокотемпературные гидротермальные флюиды поднимались к океанскому дну. Такие прожилково-вкрапленные зоны подстилают залежи массивных сульфидных руд на древних колчеданных месторождениях. При глубоководном бурении в гидротермальном поле Трансатлантического геотраверса на  $26^{\circ}08'$  с. ш. под сульфидной залежью выявлена зона, где ангидрит-кварц-сульфидная минерализация цементирует брекчии, представленные хлоритизированными и окварцованными базальтами [9].

Очень важный вопрос, на который надо дать ответ, существуют или существовали в прошлом во впадине Маркова зоны разгрузки высокотемпературных гидротермальных растворов, вблизи которых могут возникнуть “черные курильщики”? Ряд данных позволяют положительно ответить на этот вопрос. Обогащенность некоторых железомарганцевых корочек медью, цинком и двухвалентным марганцем указывает на то, что в этой впадине происходила разгрузка рудоносных гидротерм [7]. Некоторые особенности термоха-



**Рис. 3.** Зависимость показателя ослабления (ПО) проходящего света для образцов воды, отобранных с разных станций, от длины волны  $\lambda$  (относительно обр. 963-2). Измерено на прозрачнометре "Дельфин-М" (авторы В.А. Матюшенко и Б.Ф. Кельбалиханов [10]). Образцы воды отбирались розеткой глубоководных батометров General Oceanics.

линной структуры морской воды над впадиной Маркова: повышенная температура придонной воды, ее аномальный характер в зоне смешения придонных и поверхностных вод – позволяют предположить существование в этом месте гидротермального плюма и в настоящий момент. Одна из проб придонной морской воды (ст. 968), отобранной вблизи того места, откуда были драгированы рудные фрагменты, обладает повышенной мутностью. Это показали бортовые измерения степени ослабления водой проходящего света пробой морской воды (рис. 3). В придонной воде, отобранной на этой станции, концентрация меди существенно выше, чем в более верхнем горизонте воды (на 50 м).

Зоны глубинных срывов оказываются наиболее проницаемыми и для базальтовых расплавов, поскольку то небольшое количество свежих базальтов, которое было обнаружено в ходе драгирования, приурочено совместно с метаморфическими породами к узким зонам.

Изучение рифтовых долин срединно-океанических хребтов показало, что они являются осевой частью спрединга, откуда вновь сформировавшаяся кора расходится в противоположные

стороны. Образующаяся брешь заполняется либо базальтами, либо глубинными породами, сползающими по листрическим сбросам с бортов рифта. Это, как правило, не дает возможности накопиться в рифте осадочному чехлу. Следовательно, присутствие осадочного чехла в рудовмещающих рифтовых впадинах указывает на то, что днища изученных рифтовых впадин являются тектонически и вулканически стабильными участками, в которых кора не обновляется относительно длительное время. Вся тектоническая и в меньшей мере вулканическая активность сосредоточена на бортах этих впадин, куда проецируются плоскости глубинных срывов, по которым происходит вывод глубинных пород к поверхности дна.

Наличие тектонически стабильных участков в осевой зоне спрединга благоприятствует образованию под ними долгоживущих промежуточных магматических камер, в которых длительное стояние расплава приводит к его глубокой дифференциации, вплоть до образования плагιοгранитов. Об этом свидетельствуют выше указанные особенности состава габброидов и базальтов, обнаруженных на бортах впадин и так или иначе связанных с этими камерами. Повышенная тем-

пература придонной морской воды над рудовмещающими структурами также может указывать на наличие долгоживущей магматической камеры, поскольку последняя, создавая повышенный тепловой поток, может приводить к нагреву морской воды. Долгоживущие магматические камеры обычно не характерны для медленно-спрединговых хребтов. Вероятно, к северу от разлома Сьерра-Леоне они отсутствуют, поскольку базальты на этих участках не дифференцированы, габброиды представлены в основном оливиновыми разностями, а температура придонной воды наименьшая.

Судя по очень небольшому объему современных базальтов, распространенных в рудовмещающих рифтовых впадинах, магматическая активность в них реализуется и в настоящий момент главным образом в виде плутонической составляющей. Наличие долгоживущей магматической камеры под рудовмещающими структурами – один из определяющих факторов, способствующих зарождению рудоносной гидротермальной системы, поскольку она является источником тепла для нагревания морской воды, проникающей по зонам проницаемости внутрь коры и превращающейся там в гидротермальный флюид. С другой стороны, процессы глубокой дифференциации, происходящие в долгоживущей камере, приводят к образованию флюидо-магматического остатка, обогащенного некогерентными, в том числе рудными, элементами, который может поступать в гидротермальную систему.

Каков может быть механизм возникновения тектонически стабильных участков в осевой зоне спрединга? Некоторые предположения по этому поводу можно сделать, учитывая необычные геодинамические условия развития геологических процессов в этом районе, о чем уже неоднократно писалось [3,4,6]. Развитие многочисленных левосторонних сдвигов обуславливает расширение зоны растяжения за пределы рифтовой долины до размеров гребневой зоны хребта. В результате могут возникнуть условия рассеянного спрединга, в области развития которого трещины растяжения могут быть не только параллельны рифтовой долине, но и отклоняться от ее простирания. Как говорилось выше, простирание рудовмещающих рифтовых впадин таким же образом отличается от общего простирания рифтовой долины. К западу от впадины Маркова протягивается депрессия близкого к ней простирания, которая, по-видимому, является рифтовой, поскольку она не засыпана осадками и имеет сложно расчлененный, вероятно, вулканический рельеф. Можно ожидать, что в области рассредоточенного растяжения могут возникнуть “островки”, не вовлеченные в процесс растяжения.

Таким образом, в районе разлома Сьерра-Леоне возникает несколько участков, где сочетаются два определяющих фактора для возникновения и относительно длительного функционирования рудоносных гидротермальных систем: источник тепла в виде долгоживущих магматических камер и повышенная проницаемость коры, возобновляемая в результате постоянных тектонических движений.

Этот вывод казалось бы противоречит тому факту, что данный участок САХ выделяется пониженным фоном сейсмичности, что послужило основанием для прогноза сульфидного рудопроявления на этом участке, сделанного А.О. Мазаровичем и С.Ю. Соколовым [1]. Однако уровень сейсмичности оценивается по землетрясениям с магнитудой выше 4. Но можно предположить, что повышенная тектоническая активность в данном районе приводит к землетрясениям с меньшей магнитудой. Это естественно, поскольку насыщение коры гидротермальным флюидом, выступающим в качестве смазки, приводит к уменьшению силы землетрясений. Однако окончательно эти предположения могут подтвердиться при изучении микросейсмичности в районе разлома Сьерра-Леоне.

Рудовмещающие рифтовые впадины, располагающиеся в районе разлома Сьерра-Леоне, имеют геологическое строение, необычное для осевых зон медленно-спрединговых хребтов. Днище впадин тектонически пассивно и перекрыто осадочным чехлом, тектоническая активность сконцентрирована на бортах впадин и обусловлена выводом глубинных пород по плоскостям глубинных срывов. Магматическая активность осуществляется главным образом в виде плутонической составляющей, при этом расплавы глубоко дифференцируются в долгоживущих магматических камерах.

Широкое распространение габброидов при ограниченном объеме базальтов, протяженные дифференцированные серии, образуемые совокупностью базальтов и габброидов, распространение плагиогранитов, широкое развитие метаморфических пород, сформировавшихся по габброидам в условиях стрессового метаморфизма, могут выступать в качестве геологических прогностических признаков на обнаружение сульфидных рудопроявлений, подобных тем, которые встречены в районе разлома Сьерра-Леоне.

Распространенность метаморфических пород и метасоматитов, развитых по ним, позволила оконтурить на восточном борту впадины Маркова площадку, ограниченную координатами  $5.908^{\circ}$ – $5.914^{\circ}$  с.ш. и  $33.158^{\circ}$ – $33.172^{\circ}$  з.д., предпочтительной концентрации усилий для дальнейшего поиска рудной залежи и гидротермальных полей в этом районе.

Авторы благодарны членам научно-технического персонала экспедиции В.В. Велинскому, А.В. Носову, В.Н. Кузнецову, С.А. Дремучеву, В.П. Расторгуеву, А.Г. Цыцарину, В.С. Запотылько за обеспечение геофизических и гидрологических работ и признательны команде нис “Академик Иоффе” во главе с капитаном Г.А. Посконным за содействие в проведении экспедиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (Комплексная программа научных исследований “Мировой океан: геология дна, геодинамика, биология моря и экология”), РФФИ (проект 03–05–64159) и Минпромнауки РФ (ФЦП “Мировой океан”: подпрограмма “Исследование природы Мирового океана” и проект “Меридиан”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазарович А.О., Соколов С.Ю. // Литология и полез. ископаемые. 1998. № 4. С. 436–439.
2. Пейве А.А., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н. и др. // ДАН. 2001. Т. 377. № 6. С. 803–806.
3. Пуцаровский Ю.М., Бортников Н.С., Сколотнев С.Г. и др. // ДАН. 2002. Т. 384. № 1. С. 83–88.
4. Skolotnev S., Peyve A., Bortnikov N. et al. // InterRidge News. 2002. V. 11. № 1. P. 41–42.
5. Мазарович А.О., Соколов С.Ю., Турко Н.Н., Добролюбова К.О. // Рос. журн. наук о Земле. 2001. Т. 3. № 5. Электрон. версия, сайт [www.agu.org/wps/tjes](http://www.agu.org/wps/tjes).
6. Пейве А.А., Савельева Г.Н., Сколотнев С.Г. и др. // Геотектоника. 2003. № 2. С. 3–25.
7. Базилевская Е.С., Сколотнев С.Г. // ДАН. 2002. Т. 383. № 6. С. 791–795.
8. Мазарович А.О., Симонов В.А., Пейве А.А. и др. // Литология и полез. ископаемые. 2001. № 5. С. 526–533.
9. Humphris S.E., Herzig P. M., Miller D.J. et al. // Nature. 1995. V. 377. P. 713–716.
10. Матюшенко В.А., Кельбалиханов Б.Ф. // Бюл. изобр. 1983. № 43.