

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАЙОНЕ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА СЬЕРРА-ЛЕОНЕ, ЦЕНТРАЛЬНАЯ АТЛАНТИКА (ДАННЫЕ ПО РАСПЛАВНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ)

© 2005 г. В. А. Симонов*, С. В. Ковязин*, А. А. Пейве**, Ю. П. Колмогоров*

*Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН
630090 Новосибирск 90, просп. академ. Коптюга, 3; e-mail: simonov@uiggm.nsc.ru

**Геологический институт РАН
109017 Москва, Пыжевский пер., 7;
e-mail: peyve@geo.tv-sign.ru

Поступила в редакцию 23.05.2003 г.

На основе новых данных, полученных преимущественно в результате исследования расплавных включений в минералах, а также анализа базальтовых стекол и базальтов из образцов, отобранных авторами во время 22-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” в 2000 году, было выяснено, что по петрохимии, геохимии редких, редкоземельных элементов и воды в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне преобладают нормальные магматические системы срединно-океанических хребтов типа N-MORB. В то же время, для отдельных участков с рудной минерализацией и располагающихся непосредственно рядом с трансформными разломами устанавливаются свои характерные особенности магматических процессов. В участках пересечения рифта Срединно-Атлантического хребта (САХ) трогами разломов выделяются обогащенные водой и редкими элементами расплавы, что связано, скорее всего, с влиянием процессов развития трансформных разломов. Сравнительный анализ данных по составам расплавных включений в оливинах и плагиоклазах с характеристиками базальтов и базальтовых стекол, свидетельствует, что эволюция глубинных расплавов рифтовой зоны САХ в районе Сьерра-Леоне при их подъеме идет согласно тренду N-MORB с ростом железистости и с незначительным накоплением щелочей. В то время как для “рудного” участка станции S2234 данная эволюция более соответствует тренду обогащенных расплавов типа E-MORB. Анализ расплавных включений в оливинах показал, что глубинные магмы рифтовой зоны САХ в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне, формируясь на глубинах 50–60 км, имели достаточно высокие начальные температуры кристаллизации – 1275–1345°C.

Район трансформного разлома Сьерра-Леоне (6°–6°20') в Центральной Атлантике привлек особое внимание после того, как в 2000 году в ходе 22-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” здесь были обнаружены проявления гидротермальной активности и сульфидной минерализации [1, 2]. Ранее в этом регионе геолого-геофизические исследования практически не проводились и были известны только три станции драгирования, выполненные в середине 70-х годов, на которых были подняты ультрабазиты и габбро [3]. В последнее время, в результате детальных работ на участке Срединно-Атлантического хребта (САХ), ограниченном на севере разломом Богданова (7°10' с.ш.) и на юге – 5° с.ш., были рассмотрены особенности геологии и вулканизма данного района [4, 5].

Учитывая, что в районе разлома Сьерра-Леоне установлена активная роль гидротермальных процессов изменяющих породы, для выяснения первичных характеристик магматических систем

необходимо было использовать наименее зависящие от вторичных преобразований методы, среди которых выделяются исследования включений расплава, захваченные минералом во время его роста. Анализ расплавных включений в минералах позволяет получить прямую информацию о параметрах магматических процессов, так как защищенные матрицей минерала они практически не испытывают воздействие гидротерм и хорошо сохраняются даже когда вся основная масса вокруг вкрапленников полностью преобразована. В то время как стекла при этих условиях полностью разрушаются, а базальты существенно изменяют свой исходный состав. Кроме того, по расплавным включениям, в отличие от стекол и пород, есть возможность установить температурный режим магматических процессов, а также оценить параметры магматических систем на глубине.

В данном сообщении приводятся результаты исследования расплавных включений в оливинах и в плагиоклазах из образцов базальтов, отбран-

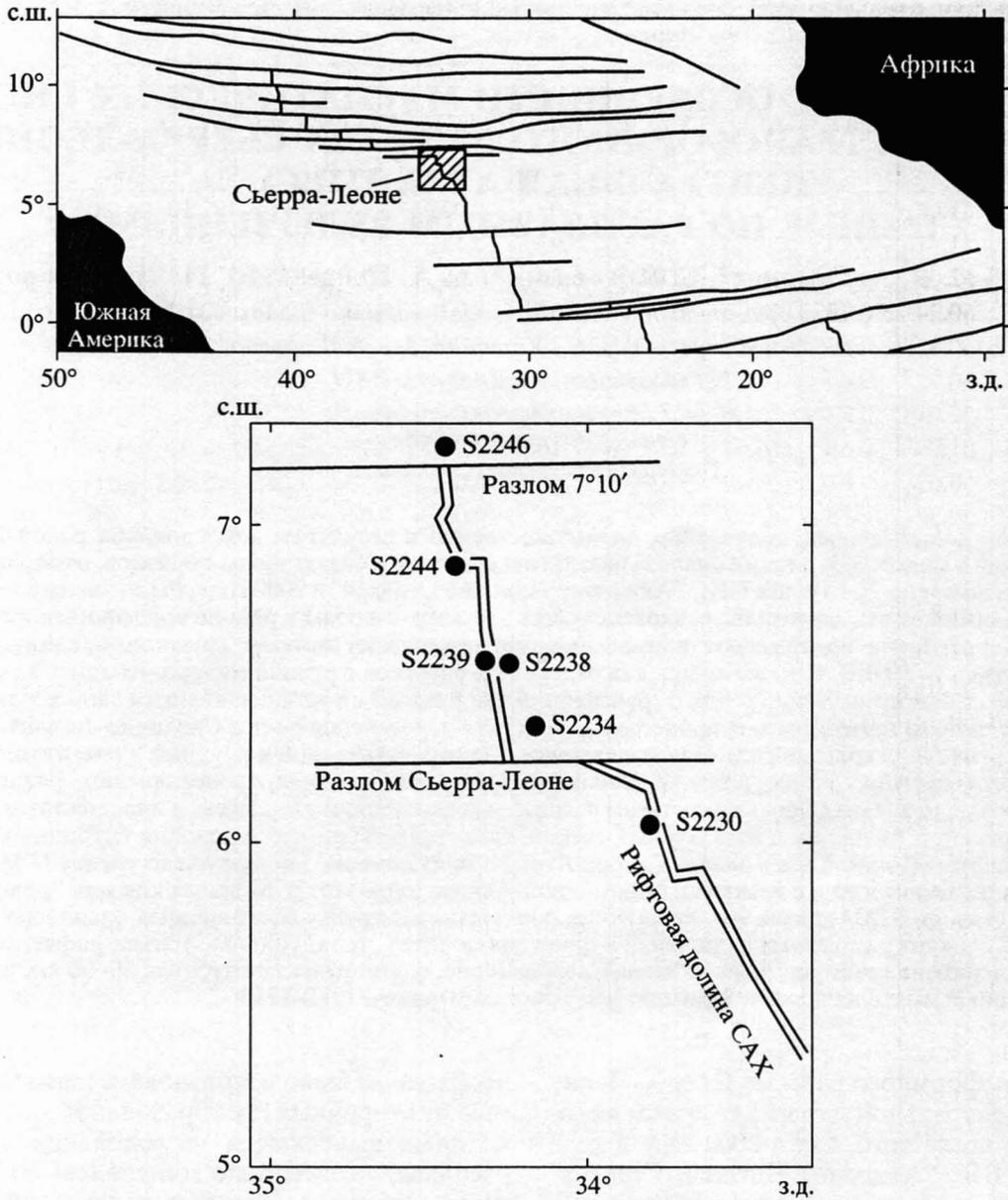


Рис. 1. Район трансформного разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) и расположение станций драгирования. S2238 – станции драгирования, каменный материал из которых был использован в ходе данных исследований.

ных авторами в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне во время 22-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” в 2000 году (рис. 1). Для получения более обоснованных и корректных выводов об особенностях магматических систем в дополнение к результатам анализа включений (табл. 1) используется оригинальная информация по базальтам и базальтовым стеклам (табл. 2, 3), имеющая непосредственную связь с данными по включениям.

Расплавные включения исследовались в высокотемпературной термокамере с инертной средой [6]. Эксперименты с включениями при высоких

температурах проводились по опубликованной ранее методике [7–9]. Составы гомогенизированных расплавных включений, вмещающих их минералов и базальтовых стекол установлены на рентгеновском микроанализаторе “Сamebax-micro” Концентрации воды в магматических стеклах определены в основном с помощью газовой хроматографии по методике, опубликованной ранее [7, 10]. Все эти исследования проведены в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Содержание редких элементов в базальтах установлены рентгенофлюоресцентным методом на станции элемент-

Таблица 1. Представительные анализы гомогенизированных расплавных включений (мас. %) в минералах из района трансформного разлома Сьерра-Леоне

№ п/п	№ образца/анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	T _{гом}
1	1.2	51.66	0.48	16.97	0.000	7.02	0.02	8.18	13.01	2.12	0.04	99.50	1250
2	3.1	51.31	0.53	16.75	0.079	6.93	0.14	8.31	12.79	2.09	0.05	98.98	1255
3	3.3	52.05	0.32	16.99	0.041	6.84	0.08	8.79	12.58	2.14	0.03	99.86	1255
4	4.1	50.94	0.42	16.63	0.000	6.55	0.03	8.66	12.43	2.04	0.03	97.74	1260
5	4.4	50.83	0.39	16.52	0.000	6.70	0.00	8.98	11.97	2.12	0.05	97.55	1250
6	4.5	50.77	0.46	16.07	0.000	7.10	0.00	9.37	12.09	2.04	0.03	97.93	1260
7	5.1	52.01	0.33	16.08	0.000	6.92	0.04	9.19	12.28	2.18	0.03	99.07	1255
8	6.1	51.80	0.65	16.55	0.000	7.16	0.00	8.75	12.64	1.94	0.03	99.52	1245
9	7.2	50.67	0.61	18.69	0.000	6.68	0.05	7.83	12.86	2.13	0.05	99.57	1270
10	7.3	50.33	0.58	18.07	0.000	6.81	0.08	8.04	12.68	2.28	0.07	98.94	1270
11	8.1	49.99	0.41	18.02	0.000	7.29	0.07	7.74	12.86	2.26	0.07	98.71	1265
12	10.1	52.11	0.36	16.65	0.000	7.62	0.03	8.01	12.47	2.30	0.07	99.62	1275
13	11.1	51.45	0.56	15.82	0.000	7.83	0.07	8.63	12.47	2.37	0.06	99.26	1270
14	11.2	51.23	0.32	16.15	0.000	7.95	0.11	8.62	12.57	2.31	0.09	99.35	1270
15	12.1	51.01	0.60	17.13	0.000	7.35	0.18	8.44	12.54	1.88	0.07	99.19	1265
16	12.2	50.52	0.65	16.78	0.000	7.97	0.04	8.87	12.34	1.76	0.05	98.98	1270
17	1.1	49.68	0.67	17.23	0.054	7.34	0.14	8.68	12.96	1.95	0.02	98.73	1215
18	2	50.46	0.64	16.07	0.080	7.33	0.11	9.83	12.46	2.19	0.03	99.20	1225
19	3	50.19	0.51	15.02	0.078	7.82	0.17	10.43	12.40	2.00	0.03	98.64	1220
20	4.1	49.53	0.49	15.77	0.080	7.35	0.11	9.89	12.88	2.01	0.03	98.13	1215
21	4.3	49.45	0.57	15.51	0.095	7.62	0.14	10.05	12.70	1.74	0.04	97.91	1220
22	5.1	50.66	0.63	17.59	0.094	6.58	0.12	8.67	12.87	2.06	0.04	99.33	1210
23	6.1	49.45	0.62	15.96	0.081	6.94	0.11	9.53	13.01	2.28	0.04	98.02	1230
24	6.2	49.50	0.60	15.97	0.064	7.12	0.10	9.93	12.71	2.29	0.02	98.30	1230
25	7	51.83	0.60	16.19	0.009	7.46	0.15	8.85	11.41	2.60	0.10	99.19	1235
26	8	51.75	0.42	15.33	0.047	7.80	0.16	8.85	11.66	2.44	0.12	98.57	1255
27	10	51.74	0.33	18.61	0.149	6.48	0.16	7.02	12.14	2.05	0.09	98.78	1245
28	11	52.80	0.40	16.32	0.041	7.69	0.13	8.37	11.91	1.94	0.09	99.70	1240
29	12	51.17	0.43	17.00	0.110	7.27	0.21	8.22	12.96	2.45	0.08	99.89	1230
30	6.53*	51.81	1.32	15.90	0.018	7.55	0.18	8.75	12.04	1.85	0.07	99.48	1210
31	7.16	52.39	1.07	15.39	0.047	8.22	0.15	7.81	11.82	2.11	0.11	99.11	1235
32	7.161*	52.37	1.12	15.37	0.045	8.25	0.15	7.80	11.79	2.12	0.10	99.13	1235
33	8.163	51.69	1.03	16.22	0.057	7.40	0.18	8.38	11.45	2.15	0.14	98.70	1230
34	1*	50.39	0.71	13.55	0.079	8.65	0.12	12.63	10.76	2.16	0.05	99.10	1330
35	2	48.83	0.66	14.73	0.087	7.90	0.14	12.40	11.43	1.82	0.05	98.04	1325
36	3.1*	49.70	0.73	14.28	0.091	7.83	0.14	13.25	11.05	2.00	0.06	99.13	1335
37	3.2	49.38	0.77	14.09	0.092	9.97	0.14	10.56	12.12	1.68	0.03	98.85	1280
38	4	50.16	0.73	15.74	0.046	6.99	0.10	11.17	12.11	2.01	0.06	99.11	1285
39	5.2*	49.52	0.77	15.31	0.081	8.61	0.17	9.87	11.68	2.17	0.04	98.22	1300
40	5.3	49.23	0.74	14.09	0.086	8.14	0.13	13.56	10.92	1.94	0.05	98.88	1325
41	6.1*	49.84	0.64	15.42	0.029	7.15	0.11	12.47	11.43	2.11	0.05	99.25	1340
42	7.2*	48.58	0.68	13.55	0.095	8.11	0.13	14.65	10.50	1.91	0.10	98.29	1330
43	8	49.99	0.98	13.88	0.088	8.06	0.21	13.31	10.57	1.96	0.06	99.11	1345

Примечание. T_{гом} – температура гомогенизации включений. 1–33 – расплавные включения в плагиоклазах из образцов: S2238/14 (1–8, станция S2238), S2230/86 (9–16, S2230), S2244/65 (17–24, S2244), S2234/37 (25–33, S2234); 34–43 – расплавные включения в оливинах из образца S2238/14 (станция S2238).

* Включения, в которых определено содержание редких, редкоземельных элементов и воды на ионном зонде.

Таблица 2. Содержание редких элементов (г/т) в базальтах из района трансформного разлома Сьерра-Леон

№ п/п	Номер образца	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
1	S2230/1	340	123	101	79	99	22.7	4.11	132	51.3	144	7.75
2	S2230/4	342	174	102	94	101	25.6	4.22	135	53.5	148	8.08
3	S2230/5	348	184	109	82	104	23.8	4.87	133	52.0	144	8.19
4	S2230/6	307	139	99	75	93	20.7	4.35	121	47.8	133	7.02
5	S2230/7	257	129	89	72	81	21.4	3.81	108	44.2	122	6.80
6	S2234/21	173	340	172	131	134	20.8	1.69	163	28.1	87	3.39
7	S2234/22	246	110	101	79	77	22.8	1.94	132	37.3	102	4.22
8	S2234/27	136	271	154	78	66	17.8	1.51	89	25.5	47	1.81
9	S2234/37	137	229	219	124	54	13.9	1.38	132	24.0	66	2.86
10	S2234/39	152	273	175	85	65	19.8	1.43	186	27.0	90	6.48
11	S2238/14	204	426	259	84	78	22.0	6.54	141	34.3	98	3.65
12	S2238/15	291	438	222	91	91	23.5	6.01	148	37.8	108	4.45
13	S2238/16	210	262	158	76	73	19.0	4.15	149	38.8	116	4.79
14	S2238/25	125	234	172	86	55	16.3	2.15	144	23.6	63	1.76
15	S2238/26	243	193	127	78	80	19.4	2.50	136	41.0	120	4.52
16	S2238/29	163	85	85	56	62	15.0	2.56	109	31.6	90	3.47
17	S2239/1	151	167	93	66	51	14.8	1.69	101	24.6	67	2.89
18	S2239/2	186	274	138	74	63	14.7	2.81	129	31.3	87	3.39
19	S2239/3	195	280	150	84	66	17.5	2.70	131	31.2	86	3.37
20	S2239/4	198	242	139	72	64	17.6	2.63	135	32.3	90	3.63
21	S2239/5	216	306	159	88	71	19.1	2.81	140	33.0	94	3.89
22	S2244/49	284	263	159	79	84	20.8	3.91	145	46.4	137	6.57
23	S2244/50	311	309	199	88	87	21.9	4.70	142	42.9	124	5.83
24	S2244/51	209	245	158	71	71	18.7	2.64	131	37.0	107	5.13
25	S2244/64	128	238	128	68	50	15.0	2.39	159	26.6	64	2.39
26	S2244/65	169	267	127	84	52	16.5	2.50	114	28.6	66	2.61
27	S2246/1	205	187	122	66	68	14.4	2.36	137	36.8	118	4.79
28	S2246/2	276	280	187	88	89	20.8	3.78	174	45.2	141	5.36
29	S2246/3	337	307	191	104	92	22.5	5.96	170	44.0	138	5.50
30	S2246/4	229	200	128	70	67	17.3	4.14	147	40.0	130	5.12
31	S2246/5	235	190	126	67	70	17.3	3.19	144	39.8	128	5.42

ного анализа Центра синхротронного излучения ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск.

Содержание редких, редкоземельных элементов и воды в расплавных включениях и в отдельных образцах стекол (табл. 4) определено методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по методике, опубликованной ранее [11]. Необходимо отметить, что результаты анализов содержания воды в одних и тех же образцах базальтовых стекол, прове-

денных с помощью ионного зонда и газовой хроматографии совпадают, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Расплавные включения в оливинах. В районе трансформного разлома Сьерра-Леоне расплавные включения в оливинах были найдены только в базальтовых порфиритах рифтовой зоны САХ на участке станции S2238. Первичные расплавные включения (размерами 10–90 мкм) располага-

Таблица 3. Представительные анализы базальтовых стекол (мас. %) из района трансформного разлома Сьерра-Леоне

№ п/п	Номер образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Сумма
1	S2230/1	51.28	1.78	14.74	0.000	10.59	0.17	6.88	10.15	2.99	0.14	0.58	99.29
2	S2230/4	51.07	1.83	14.52	0.007	10.57	0.19	6.76	10.20	3.01	0.14	0.66	98.96
3	S2230/5	50.92	1.83	14.42	0.000	10.56	0.18	6.87	10.24	2.94	0.13	0.58	98.66
4	S2230/6	51.55	1.81	14.53	0.037	10.49	0.17	6.95	10.15	2.94	0.12	0.59	99.33
5	S2230/7	51.77	1.80	14.38	0.000	10.54	0.21	6.89	10.10	3.06	0.12	0.68	99.55
6	S2238/25	49.17	1.06	17.23	0.034	8.38	0.17	9.24	11.35	2.65	0.02	0.20	99.51
7	S2238/25/7*	49.02	1.09	17.11	0.054	8.46	0.18	9.03	11.58	2.71	0.05	0.19	99.47
8	S2238/26	49.98	1.49	15.57	0.013	9.60	0.15	7.61	10.73	2.98	0.10	0.28	98.50
9	S2238/26/8*	50.71	1.59	15.58	0.048	9.76	0.18	7.66	10.93	2.72	0.12	0.35	99.65
10	S2238/29	52.07	1.46	15.13	0.001	9.54	0.20	7.63	10.80	2.82	0.07	0.20	99.91
11	S2238/29/9*	51.28	1.51	14.95	0.060	9.50	0.20	7.70	11.05	2.73	0.09	0.32	99.39
12	S2238/30	51.53	1.47	14.93	0.000	9.34	0.16	8.07	10.76	3.08	0.07	0.35	99.75
13	S2238/39	51.85	1.46	14.91	0.000	9.51	0.18	7.78	10.81	2.96	0.07	0.21	99.75
14	S2239/1	51.91	1.38	15.04	0.017	8.84	0.16	8.09	11.54	2.57	0.05	0.11	99.70
15	S2239/2	51.49	1.38	15.09	0.031	8.76	0.17	8.04	11.54	2.70	0.06	0.18	99.43
16	S2239/3	51.38	1.36	15.22	0.015	8.67	0.16	8.07	11.41	2.71	0.07	0.18	99.24
17	S2239/4	51.66	1.34	15.15	0.010	8.88	0.18	8.01	11.53	2.82	0.06	0.16	99.79
18	S2239/5	51.21	1.38	15.31	0.022	8.80	0.18	8.08	11.43	2.84	0.06	0.15	99.46
19	S2244/50	50.22	1.62	14.91	0.046	9.42	0.15	8.29	10.62	2.84	0.10	0.35	98.56
20	S2244/51	50.97	1.47	15.18	0.013	9.06	0.19	8.24	10.89	2.73	0.12	0.25	99.11
21	S2244/81	51.90	1.44	15.02	0.000	8.91	0.16	8.42	10.98	2.63	0.09	0.18	99.73
22	S2244/84	51.37	1.64	14.86	0.036	9.39	0.17	8.10	10.44	2.74	0.11	0.29	99.14
23	S2244/87	50.95	1.62	14.83	0.017	9.52	0.18	8.07	10.49	2.89	0.10	0.26	98.93
24	S2246/1	50.57	1.68	15.38	0.037	9.62	0.18	7.52	10.48	3.20	0.09	0.35	99.10
25	S2246/2	50.54	1.69	15.53	0.020	9.45	0.19	7.40	10.44	3.12	0.10	0.36	98.84
26	S2246/3	50.85	1.68	15.29	0.009	9.48	0.15	7.35	10.60	3.26	0.11	0.36	99.14
27	S2246/4	50.75	1.66	15.35	0.015	9.72	0.15	7.55	10.60	3.21	0.10	0.49	99.59
28	S2246/5	50.81	1.72	15.42	0.001	9.53	0.18	7.56	10.50	3.16	0.09	0.43	99.40

* Базальтовые стекла, в которых определено содержание редких, редкоземельных элементов и воды на ионном зонде.

ются равномерно в кристаллах оливина. Формы округло-ограниченные, иногда вытянутые. По соотношению фаз внутри включений можно выделить несколько разновидностей: однофазовые включения стекла; двухфазовые включения с газовым пузырьком в светлом стекле; включения со сростками игольчатых кристалликов в светлом стекле + газовый пузырек; во включении светлое стекло занимает краевые части включений, а в центре – микрзернистый агрегат. При нагреве в микротермокамере около 960°C начинает темнеть стекло во включениях. При 1150–1220°C тают кристаллические фазы в светлом расплаве. Полностью

гомогенными включения в оливинах становятся в широком диапазоне температур: 1275–1340°C. Сравнение температур гомогенизации расплавленных включений, полученных экспериментально, с рассчитанными по программе PETROLOG [12] ликвидусными температурами показало, что большинство значений соответствует пределам точности использованных термометров (рис. 2). Устанавливается прямая связь составов расплавленных включений и температур их гомогенизации – более магнезиальные расплавы обладают повышенными температурными характеристиками (рис. 3). В ходе снижения температуры наблюда-

Таблица 4. Содержание редких, редкоземельных элементов (г/т) и воды (мас. %) в гомогенизированных расплавных включениях и в базальтовых стеклах из района трансформного разлома Сьерра-Леоне (по данным ионного анализа)

Элемент, вода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Li	2.78	2.63	2.52	2.65	2.95	4.76	6.37	3.10	5.00	4.70
Be	0.200	0.161	0.184	0.171	0.199	н.о.	н.о.	0.288	0.537	0.441
B	0.87	0.85	0.59	0.60	0.68	0.46	0.77	0.35	0.89	0.80
V	203	210	213	207	214	186	193	189	268	294
Cr	455	464	409	485	478	317	197	304	284	188
Sr	75.88	77.72	77.95	92.99	83.95	131.03	131.03	123.09	120.99	114.05
Y	14.88	16.03	15.07	15.18	16.64	14.92	14.65	18.59	33.22	28.32
Zr	36.76	36.12	33.84	40.48	40.58	54.71	47.06	50.20	97.26	81.02
Nb	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	5.373	2.783	1.444	3.866	2.745
Ba	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	13.05	17.34	5.66	15.82	12.05
La	2.378	1.477	1.446	1.958	2.168	3.037	2.435	1.816	3.910	3.083
Ce	5.786	4.718	4.376	5.989	5.996	8.787	7.384	6.162	12.089	10.071
Nd	4.613	4.074	4.084	4.863	4.726	6.285	5.588	5.525	10.406	8.979
Sm	1.635	1.706	1.647	1.578	1.818	2.001	2.019	1.951	3.871	3.206
Eu	0.590	0.616	0.575	0.684	0.726	0.711	0.715	0.741	1.190	1.000
Dy	2.619	2.500	2.393	2.299	2.605	2.495	2.807	2.924	4.926	4.639
Er	1.776	1.818	1.646	1.567	1.655	1.469	1.527	1.923	3.237	2.919
Yb	1.524	1.724	1.393	1.526	1.669	1.393	1.750	1.786	3.124	2.619
H ₂ O	0.24	0.23	0.23	0.16	0.23	0.03	0.03	0.19	0.35	0.32

Примечание. 1–7 – гомогенизированные расплавные включения в оливинах (1 – S2238/14/7.2, 2 – S2238/14/5.2, 3 – S2238/14/6.1, 4 – S2238/14/3.1, 5 – S2238/14/1) и в плагиоклазах (6 – S2234/37/6.53, 7 – S2234/37/7.161); 8–10 – базальтовые стекла (8 – S2238/25/7, 9 – S2238/26/8, 10 – S2238/29/9); н. о. – содержание элемента не определено.

ется повышение железистости расплавов. В целом, все эти данные являются независимыми критериями достоверности результатов изучения расплавных включений в оливинах Сьерра-Леоне, показывая, что установленные высокие температуры магматических процессов вполне реальны. Достаточно высокие температурные параметры свидетельствуют о том, что включения должны характеризовать параметры глубинных расплавов.

Расплавные включения в плагиоклазах. Расплавные включения в плагиоклазах встречаются в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне значительно чаще, чем включения в оливинах и установлены в образцах целого ряда станций драгирования, что позволило рассмотреть особенности изменения характеристик магматических систем на значительном расстоянии вдоль рифтовой зоны. Первичные расплавные включения в плагиоклазах (размерами 5–25 мкм) либо занимают центры вкрапленников, либо располагаются по прямолинейным зонам роста. Включения имеют обычно формы прямоугольных пластинок и содержат множество темных и светлых кристаллических фаз. Температуры гомогенизации варьи-

руют в широком диапазоне от 1210 до 1275°C. Максимальные температуры (1265–1275°C) ха-

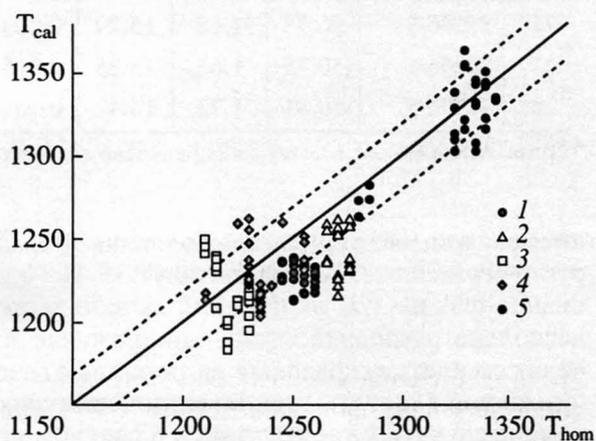


Рис. 2. Соотношение расчетных ликвидусных температур кристаллизации (T_{cal}) и температур гомогенизации расплавных включений (T_{hom}).

1–4 – включения в плагиоклазах (1 – станция S2238, 2 – S2230, 3 – S2244, 4 – S2234); 5 – включения в оливинах из станции S2238. Пунктиром показаны пределы точности расчетного термометра. Расчет температур проводился для давления 2 кбар по программе PETROLOG [12].

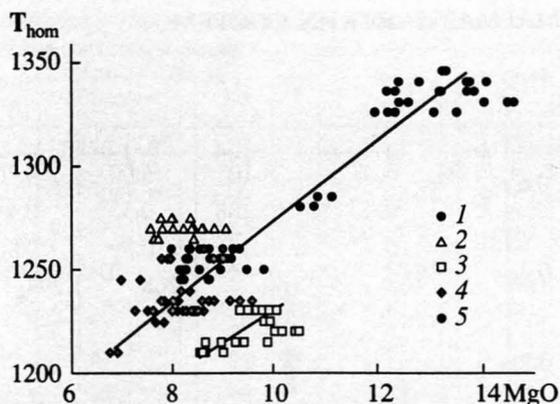


Рис. 3. Соотношение температур гомогенизации включений с содержанием MgO в гомогенизированных расплавных включениях.

Условные обозначения см. на рис. 2.

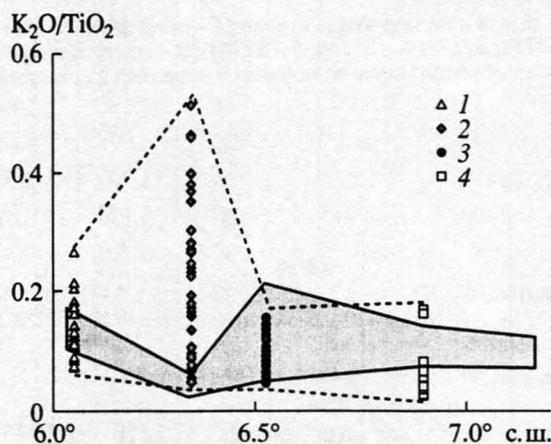


Рис. 4. Распределение значений K_2O/TiO_2 в расплавных включениях в плагиоклазах вдоль рифтовой зоны САХ.

1 – станция S2230; 2 – S2234; 3 – S2238; 4 – S2244. Серое поле – значения K_2O/TiO_2 для базальтов.

характерны для плагиоклазов станции S2230. Минимальные (1210–1230°C) отмечаются для станции S2244. Наиболее широкий интервал (1210–1255°C) установлен для магм “рудной” станции S2234. В случае типичной магматической системы рифта САХ (станция S2238) наблюдается довольно узкий диапазон – 1245–1260°C.

Среди включений в плагиоклазах температуры гомогенизации хорошо соответствуют расчетным данным для станций S2234 и S2244 (несмотря на существенный разброс значений), в то время как в случае станций S2238 и S2230 температуры гомогенизации завышены по отношению к расчетным, хотя значительная часть из них находится в пределах ошибки термометра (рис. 2). Сравнение температур гомогенизации с расчетными ликвидусными температурами показало, что при повышении давления от 1 до 2 кбар отчет-

ливо улучшается сходимость экспериментальных и теоретических данных. Особенно это характерно для станции S2234, в случае которой исследовались включения в плагиоклазах фактически интрузивных пород – долеритовых порфиритов.

На диаграмме соотношения температур гомогенизации и значений MgO (рис. 3) отчетливо видно, что данные по станции S2238 идеально располагаются на прямолинейном тренде прямой зависимости температур гомогенизации включений от их магнезиальности. К этому тренду приурочены и точки включений в плагиоклазе рудной станции S2234. Для включений в плагиоклазе станции S2244 намечается свой самостоятельный тренд прямой зависимости температур от магнезиальности параллельный тренду станции S2238. Таким образом, для всех станций, кроме S2230, наблюдается прямая корреляция температур и составов включений, что является дополнительным подтверждением достоверности полученных результатов. Все же следует отметить, что в случае включений в плагиоклазе, несмотря на тщательный визуальный контроль во время экспериментов, есть определенная доля вероятности подплавления минерала из-за его относительной нестойкости при высоких (свыше 1200°C) температурах и обогащения содержимого включений отдельными компонентами. Необходимо учитывать эти особенности при использовании включений в плагиоклазах для реконструкции составов магм. В то же время, плагиоклазы содержат минимальные количества калия и титана и поэтому плавление матрицы минерала не должно оказать существенного влияния на их распределение. В связи с этим, представляется достаточно обоснованным применение отношения K_2O/TiO_2 для гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазах для выяснения геохимических особенностей магматических систем [13].

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСПЛАВОВ

Наиболее полную информацию об океанических магматических системах можно получить при совместном исследовании базальтов, базальтовых стекол и расплавных включений в минералах. В результате того, что во время морской экспедиции вдоль рифтовой зоны отбирались образцы, в которых были изучены породы в целом, магматические стекла и расплавные включения, оказалось возможным проследить изменение составов магм от разлома 7°10' до разлома Сьерра-Леоне. При сравнении данных по разным объектам наиболее объективную информацию несут значения отношения K_2O/TiO_2 , во-первых, в связи с тем, что в процессах фракционирования обычно растут оба компонента, но при этом значения их

отношений практически не меняется. Во-вторых, как было показано выше, на величинах данных отношений в составах включений не должны отражаться особенности проведения экспериментов с включениями. На рис. 4 видно, что данные по базальтам имеют низкие значения K_2O/TiO_2 (до 0.2), характерные для нормальных базальтовых пород срединно-океанических хребтов типа N-MORB и хорошо согласуются с расплавленными включениями, попадая в пределы их интервалов. Высокие значения K_2O/TiO_2 (до 0.5), установленные для расплавленных включений в плагиоклазах станции S2234 с сульфидами, близки к данным по расплавленным включениям в плагиоклазах из обогащенных базальтов зоны трансформного разлома $15^{\circ}20'$ [13]. В то же время, преобладающие значения калия во включениях станции S2234 не превышают 0.15%, т.е. это нормальные расплавы типа N-MORB. Учитывая, что породы станции S2234 значительно изменены, минимум K_2O/TiO_2 для базальтов данной станции можно объяснить, по всей вероятности, выносом калия в ходе вторичных гидротермальных процессов.

Анализ распределения летучих компонентов в базальтовых стеклах, отобранных вдоль рифтовой зоны САХ (рис. 5), показал явное обогащение водой расплавов в районах непосредственной близости к трансформным разломам (станции S2230, S2246), совпадающих по этим характеристикам с обогащенными магматическими системами срединно-океанических хребтов типа E-MORB. В то время как другие станции по содержанию воды соответствуют нормальным расплавам типа N-MORB. При этом значения H_2O в стеклах S2238, определенные с помощью газовой хроматографии (0.2–0.35 мас. %) совпадают с результатами анализа на ионном зонде (0.19–0.35 мас. %), что является хорошим критерием достоверности полученных данных. Содержания воды в расплавленных включениях в оливинах, представляющих магматические расплавы на глубине, свидетельствуют о нормальных сухих магматических системах (0.16–0.24 мас. % H_2O), в то время как для обогащенных магм (типа E-MORB) значительное количество воды (0.6 мас. % H_2O) характерно и для глубинных систем, судя по данным изучения включений в оливинах из зоны разлома $15^{\circ}20'$ [14].

Устанавливается прямая корреляция содержания воды и калия в базальтовых стеклах зоны разлома Сьерра-Леоне (рис. 6). Значения отношения H_2O/K_2O ближе к 4/1 и в этом они хорошо согласуются с соответствующей группой базальтовых стекол срединно-океанических хребтов [13], где и располагаются данные по стеклам практически всех станций Сьерра-Леоне (кроме S2230, для которой характерны максимальные содержания воды). В то же время, основная масса магматических стекол срединно-океанических хребтов распределяется вдоль линии 1/1, к которой ориен-

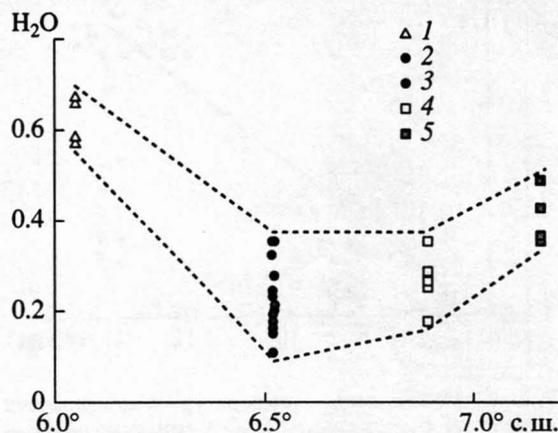


Рис. 5. Распределение содержания воды в базальтовых стеклах и в расплавленных включениях вдоль рифтовой зоны САХ.

1, 3, 4, 5 – базальтовые стекла (1 – станция S2230; 3 – S2238, S2239; 4 – S2244; 5 – S2246); 2 – гомогенизированные расплавленные включения в оливинах из станции S2238.

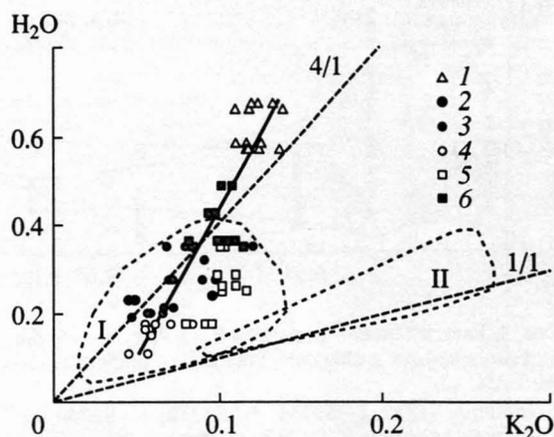


Рис. 6. Диаграмма $H_2O - K_2O$ для базальтовых стекол и расплавленных включений.

1, 3, 4, 5, 6 – базальтовые стекла (1 – станция S2230, 3 – S2238, 4 – S2239, 5 – S2244, 6 – S2246); 2 – гомогенизированные расплавленные включения в оливинах из станции S2238. I – поле базальтовых стекол САХ с преобладанием H_2O над K_2O [13]. II – поле базальтовых стекол типа N-MORB из зоны трансформного разлома $15^{\circ}20'$ [13].

тировано поле стекол типа N-MORB из зоны трансформного разлома $15^{\circ}20'$ [13]. Наиболее сухими являются стекла станции S2239, причем воды в них меньше даже чем в расплавленных включениях в оливине. В целом, расплавленные включения в оливинах станции S2238, как по содержанию воды, так и калия фактически совпадают с данными по стеклам из этой станции, что свидетельствует практически об отсутствии процессов дифференциации глубинных расплавов при их подъеме к поверхности дна океана в данном районе. Таким обра-

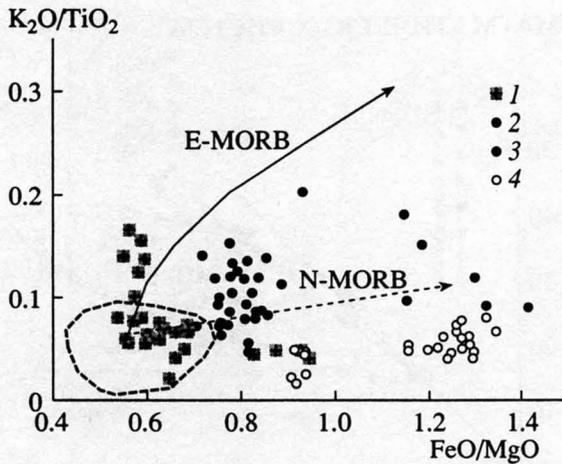


Рис. 7. Диаграмма K_2O/TiO_2 – FeO/MgO для расплавных включений, базальтов и базальтовых стекол станции S2238.

1, 2 – гомогенизированные расплавные включения в оливинах (1) и в плагиоклазах (2); 3 – базальты; 4 – базальтовые стекла. E-MORB – тренд обогащенных базальтов зоны трансформного разлома $15^\circ 20'$ [13]. N-MORB – тренд нормальных базальтов зоны трансформного разлома $15^\circ 20'$ [13]. Оконтурено поле наиболее примитивных, начальных расплавов зоны трансформного разлома $15^\circ 20'$ [13].

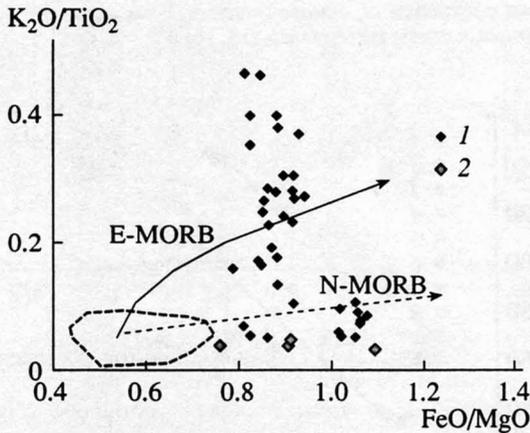


Рис. 8. Диаграмма K_2O/TiO_2 – FeO/MgO для расплавных включений и базальтов “рудной” станции S2234.

1 – гомогенизированные расплавные включения в плагиоклазах; 2 – базальты. Остальные условные обозначения см. на рис. 7.

зом, в зоне разлома Сьерра-Леоне развиты магматические системы с преобладанием воды над очень низкими содержаниями калия и в этом магматизм этого региона отличается от других трансформных разломов и от преобладающих тенденций для срединно-океанических хребтов.

Учитывая, что отбор проб с базальтами и стеклами производился как в самом центре рифтовой долины (современный магматизм, станция S2239), так и в борту рифта (S2238), мы имеем возмож-

ность проследить изменение геохимических характеристик во времени. При сравнении данных по стеклам из этих станций отчетливо видно, что содержания воды явно уменьшаются со временем и в настоящий период изливаются самые сухие расплавы. Значения титана и калия также падают. Таким образом, в зоне разлома Сьерра-Леоне идет эволюция магматических систем во времени с одновременным уменьшением воды, титана и калия и в результате самые примитивные магмы изливаются в настоящий период.

Особенности эволюции глубинных расплавов зоны трансформного разлома Сьерра-Леоне при их подъеме к поверхности дна можно проследить, сравнивая данные по расплавленным включениям, базальтам и стеклам. Такой сравнительный анализ был проведен для станций S2238 и S2234. Для станции S2238 минимальные значения отношения K_2O/TiO_2 и железистости (FeO/MgO) характерны для включений в оливинах, которые в большинстве своем располагаются в поле наиболее примитивных расплавов, близких к исходным составам расплавных включений в оливинах из базальтов САХ [13]. Более дифференцированы расплавные включения в плагиоклазах и максимум железистости отмечается для базальтов и стекол. В целом, в районе станции S2238 эволюция глубинных магматических систем (фиксируемая последовательной сменой: расплавные включения в оливинах – расплавные включения в плагиоклазах – базальты и стекла) идет согласно тренду N-MORB в основном с ростом FeO/MgO и с незначительным увеличением роли калия (рис. 7). В случае “рудной” станции (S2234) включения в плагиоклазах имеют повышенные значения K_2O/TiO_2 , соответствующие тренду E-MORB, в то время как базальты сильно истощены калием и явно принадлежат к N-MORB. Здесь, как уже отмечалось выше, вполне вероятно, что низкие значения калия в базальтах связаны не с магматическими системами, а обусловлены вторичными процессами выноса, так как породы сильно изменены. В то время как сами магматические системы, судя по расплавленным включениям, могут носить характер обогащенных (рис. 8).

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Анализ соотношений таких устойчивых при вторичных процессах редких элементов, как Y и Zr в базальтах, базальтовых стеклах и расплавленных включениях из района трансформного разлома Сьерра-Леоне показал, что все значения образуют фактически прямолинейный тренд, более близкий к распределению этих компонентов в хондрите, чем в типичных базальтах срединно-океанических хребтов (рис. 9). Наиболее обогащены базальты самых северных и южных участ-

ков полигона (станции S2246 и S2230). Породы этих станций выделяются и на диаграмме Zr-Sr (рис. 10), где они образуют четкие прямолинейные тренды с максимумом циркония. Так как станция S2246 приурочена к непосредственному пересечению с трансформным разломом 7°10', а станция S2230 явно связана с развивающимися структурами разлома Сьерра-Леоне, то мы можем вполне обоснованно говорить о том, что обогащение данных магматических систем иттрием и цирконием обусловлено, скорее всего, влиянием процессов развития трансформных разломов, налегающих на более общую геодинамику срединно-океанических хребтов. Базальты и расплавленные включения в плагиоклазах станции S2234, где развита рудная сульфидная минерализация, отличаются сочетанием умеренных и низких значений Zr и Y при относительно повышенных содержаниях стронция (рис. 9, 10). Расплавленные включения в оливинах станции S2238 характеризуются минимальными значениями иттрия, циркония и стронция. При сравнении этих данных с содержаниями элементов в базальтах выясняется, что эволюция глубинных расплавов рифта САХ в зоне разлома Сьерра-Леоне при их подъеме к поверхности дна океана идет с одновременным ростом Y, Zr, Sr. Подобные тенденции характерны и для станций S2246 и S2230, в то время как для базальтов "рудной" станции S2234 при постоянных значениях циркония растут содержания стронция, что связано скорее всего с привнесом Sr в ходе воздействия на породы гидротермальных систем, а цирконий устойчив при вторичных процессах.

По характеру распределения редкоземельных элементов изученные базальтовые стекла из района трансформного разлома Сьерра-Леоне в большинстве случаев хорошо соответствуют данным по нормальным базальтам срединно-океанических хребтов типа N-MORB. В то же время, расплавленные включения существенно обогащены тяжелыми лантаноидами и совпадают с N-MORB по легким, содержание которых отчетливо увеличивается от включений в оливинах к включениям в плагиоклазах (рис. 11).

Сравнивая полученные данные по содержанию редких и редкоземельных элементов в расплавленных включениях и в стеклах района трансформного разлома Сьерра-Леоне с информацией по базальтовым стеклам из ближайших сегментов САХ, видим, что по этим характеристикам расплавы Сьерра-Леоне близки к магмам САХ на 4–5° с.ш. (рис. 12). По соотношению Yb/Sm–La/Sm магматические системы района разлома Сьерра-Леоне хорошо соответствуют магмам САХ на 8° с.ш., явно отличаясь от расплавов более южных областей САХ (рис. 13).

Сравнение с информацией по редким и редкоземельным элементам в расплавленных включениях в

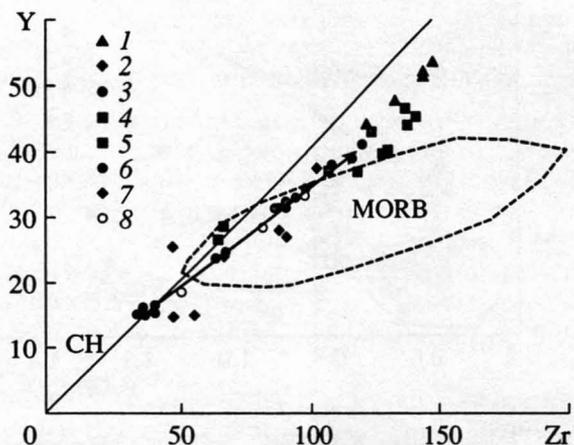


Рис. 9. Соотношение иттрия и циркония в расплавленных включениях, в базальтовых стеклах и в базальтах. 1, 2, 3, 4, 5 – базальты (1 – станция S2230; 2 – S2234; 3 – S2238, S2239; 4 – S2244; 5 – S2246); 6 – гомогенизированные расплавленные включения в оливинах из станции S2238; 7 – гомогенизированные расплавленные включения в плагиоклазах из станции S2234; 8 – базальтовые стекла из станции S2238. CH – соотношение Y/Zr в хондритах. MORB – поле базальтов срединно-океанических хребтов. Стрелкой указан тренд эволюции глубинных расплавов станции S2238. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов [15, 16].

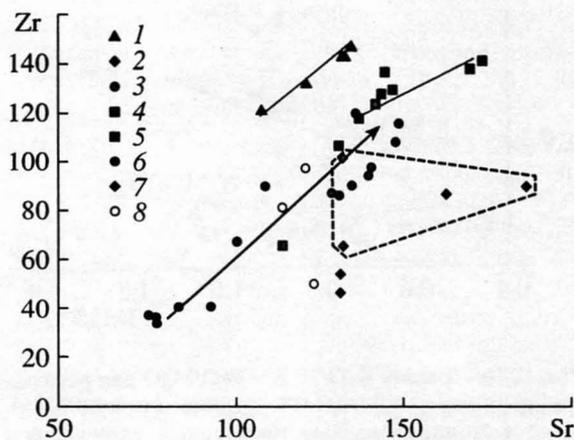


Рис. 10. Соотношение циркония и стронция в расплавленных включениях, в базальтовых стеклах и в базальтах. Условные обозначения см. на рис. 9. Пунктиром обозначено поле базальтов станции S2234. Стрелка – тренд эволюции глубинных расплавов станции S2238.

оливинах из пород 9° с. ш. Срединно-Атлантического хребта [8], показывает, что по соотношению La/Sm–Zr/Y включения в оливинах Сьерра-Леоне близки к данным по нормальным расплавам, формировавшимся при плавлении мантийного вещества с образованием около 5 процентов расплава. Судя по несколько повышенным значениям La/Sm

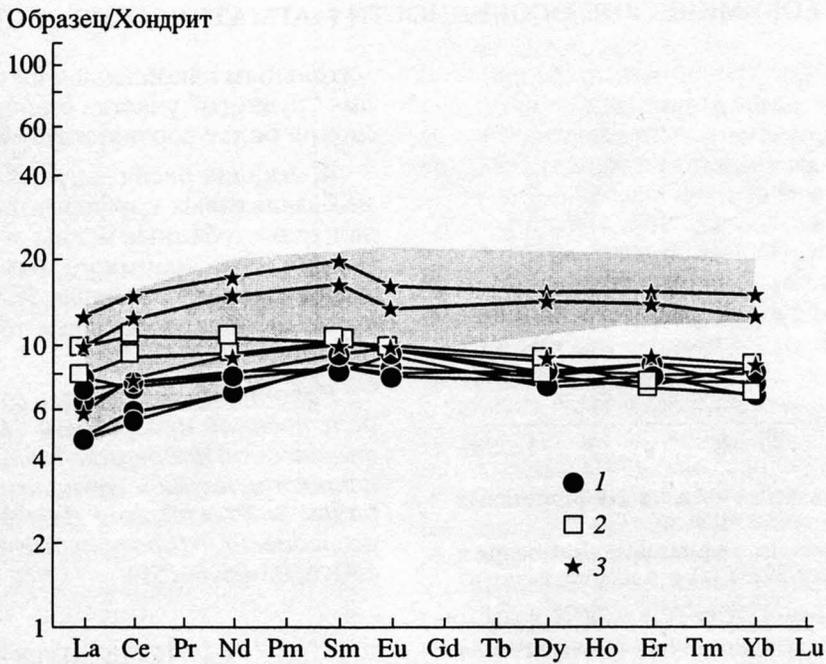


Рис. 11. Распределение редкоземельных элементов в расплавных включениях и в базальтовых стеклах.

1, 2 – гомогенизированные расплавные включения в оливинах из станции S2238 (1) и в в плагиоклазах из станции S2234 (2); 3 – стекла из станции S2238. Серым обозначено поле базальтов типа N-MORB по данным [17]. Значения элементов нормированы к составу хондрита согласно [18].

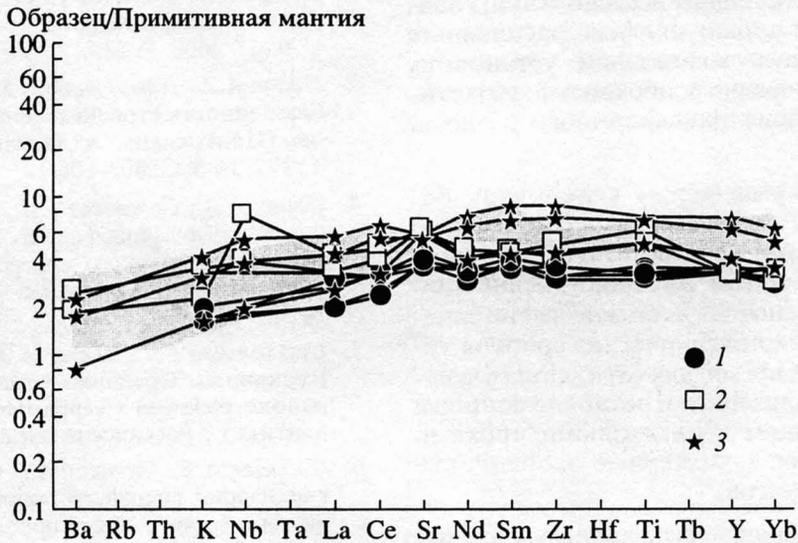


Рис. 12. Спайдердиаграмма для расплавных включений и базальтовых стекол.

Условные обозначения см. на рис. 11. Серым обозначено поле базальтовых стекол CAZ на 4–5° с.ш. по данным [19, 20]. Значения элементов нормированы к составу примитивной мантии согласно [21].

во включениях, доля выплавлявшегося первичного расплава в районе Сьерра-Леоне могла быть больше пяти процентов. При использовании соотношения $(Sm/Yb)_{N, 0.1} - Na_{(8, 0.1)}$ мас. % в составах расплавных включений в оливинах, на основе материалов из работы [22], были определены глуби-

ны генерации магм Сьерра-Леоне, которые составили около 50–60 км, соответствуя по этим параметрам расплавам типа N-MORB и хорошо согласуясь с данными полученными нами ранее [23] на основе анализа базальтовых стекол из этого района (48–55 км).

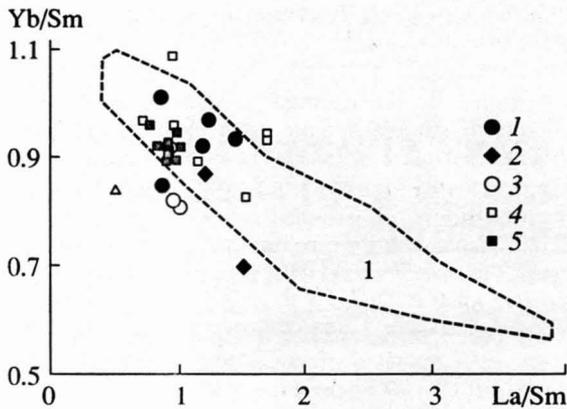


Рис. 13. Диаграмма Yb/Sm – La/Sm для расплавных включений и базальтовых стекол.

1, 2 – гомогенизированные расплавные включения в оливинах из станции S2238 (1) и в плагиоклазах из станции S2234 (2); 3 – стекла из станции S2238; 4 – базальтовые стекла САХ на 4–5° с.ш.; 5 – базальтовые стекла САХ на 8° с.ш. 1 – поле базальтовых стекол южных сегментов САХ (3° с.ш. – 3° ю.ш.). Используются данные по базальтовым стеклам из работ [19, 20].

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований, главным образом с помощью анализа расплавных включений, оказалось возможным установить некоторые геохимические особенности магматических систем в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне.

1. Исследования расплавных включений, базальтовых стекол и базальтов показали, что по петрохимии, геохимии редких, редкоземельных элементов и воды в районе разлома Сьерра-Леоне в целом преобладают нормальные магматические системы срединно-океанических хребтов типа N-MORB. В то же время, для отдельных участков с рудной минерализацией и располагающихся непосредственно рядом с разломными трогами устанавливаются свои характерные особенности магматических процессов.

2. Среди преобладающих низкокальциевых и сухих базальтовых магм типа N-MORB района Сьерра-Леоне в участках пересечения рифта САХ трогами разломов выделяются расплавы обогащенные водой и редкими элементами, что связано, скорее всего, с влиянием процессов развития трансформных разломов, накладывающихся на более общие магматические процессы в САХ.

3. Сравнительный анализ данных по составам расплавных включений в оливинах и плагиоклазах с характеристиками базальтов и базальтовых стекол, свидетельствует, что эволюция глубинных расплавов рифтовой зоны САХ в районе Сьерра-Леоне при их подъеме идет согласно тренду N-MORB с ростом железистости и с незна-

чительным накоплением щелочей. В то же время, для “рудного” участка станции S2234 данная эволюция более соответствует тренду E-MORB.

4. Анализ расплавных включений в оливинах из базальтовых порфиров станции S2238 показал, что глубинные магмы рифтовой зоны САХ в районе трансформного разлома Сьерра-Леоне, формируясь на глубинах 50–60 км, имели достаточно высокие начальные температуры кристаллизации – 1275–1345°C.

Работы проводились в соответствии с государственной программой “Мировой океан” при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 00-05-64235, 02-05-64046, 03-05-64159).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазарович А.О., Симонов В.А., Пейве А.А. и др. Гидротермальная минерализация разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 5. С. 1–8.
2. 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. V. 9 (2). 2000. P. 28.
3. Пейве А.А., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н. и др. Особенности строения района разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) // Докл. РАН. 2001. Т. 377. № 6. С. 803–806.
4. Пейве А.А., Савельева Г.Н., Сколотнев С.Г., Симонов В.А. Динамика формирования океанической коры в области “сухого” спрединга (7°10' с.ш. – 5° с.ш.) Центральной Атлантики // Геотектоника. 2003. № 3.
5. Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Симонов В.А. и др. Вулканизм Срединно-Атлантического хребта в районе разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) // Российский журнал наук о Земле. 2003.
6. 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.
7. Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.
8. Соболев А.В. Проблемы образования и эволюции мантийных магм/Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 1997. 50 с.
9. 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.
10. Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология). Новосибирск, 1990. 32 с.

11. *Соболев А.В.* Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // *Петрология*. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.
12. *Danyushevsky L.V.* The effect of small amounts of H₂O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // *J. Volcan. Geoth. Res.* 2001. V. 110. № 3–4. P. 265–280.
13. *Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А.* Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1999. 224 с.
14. *Sobolev A.V., Chaussidon M.* H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-oceanic ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 137. P. 45–55.
15. *Шараськин А.Я., Закариадзе Г.С.* Особенности развития магматизма при формировании котловин и островных дуг Филиппинского моря // *Магматизм и метаморфизм как индикаторы геодинамического режима островных дуг*. М.: Наука, 1982. С. 210–221
16. *Saunders A.D., Tarney J., Stern C.R., Dalziel I.W.D.* Geochemistry of Mesozoic marginal basin floor igneous rocks from southern Chile // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1980. V. 90. P. 237–258.
17. *Шараськин А.Я.* Тектоника и магматизм окраинных морей в связи с проблемами эволюции коры и мантии. М.: Наука, 1992. 163 с.
18. *Boynnton W.V.* Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry*. Elsevier. 1984. P. 63–114.
19. *Суцневская Н.М., Бонатти Э., Пейве А.А. и др.* Гетерогенность рифтового магматизма приэкваториальной провинции Срединно-Атлантического хребта (15° с.ш. – 3° ю.ш.) // *Геохимия*. 2002. № 1. С. 30–55.
20. *Hannigan R.E., Basu A.R., Teichmann F.* Mantle reservoir geochemistry from statistical analysis of ICP-MS trace element data of equatorial mid-Atlantic MORB glasses // *Chemical Geology*. 2001. V. 175. P. 397–428.
21. *Rollinson H.R.* Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical. London, 1993. 352 p.
22. *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.
23. *Симонов В.А., Пейве А.А., Ковязин С.В.* Особенности магматических процессов в зоне трансформного разлома Сьерра-Леоне (Экваториальная Атлантика) // 7-я Международная конференция по тектонике плит им. Л.П. Зоненшайна. М.: Научный мир, 2001. С. 475–476.