

УДК 551

ИЗМЕНЕНИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИНСКИЕ ПОРОДЫ БОКСИТОВ ПЛАТО ГАЛЕО-ДАНИЭЛЛЕ (ПРОВИНЦИЯ АДАМАВА, КАМЕРУН)

© 2020 г. D. G. Nyamsari^{a, *}, M. G. Yalcin^{a, **}, И. Ф. Вольфсон^{b, ***}

^aФакультет инженерной геологии Университета Акдениз,
Анталья, 07058 Турция

^bОбщественная организация Российское геологическое общество,
ул. 2-ая Роцинская, 10, Москва, 115191 Россия

*e-mail: dnyamsari@yahoo.com

**e-mail: guruhanyalcin@akdeniz.edu.tr

***e-mail: rosgeo@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.

После доработки 24.06.2019 г.

Принята к публикации 30.10.2019 г.

Плато Галео-Даниэлле является крупнейшим месторождением бокситов рудного района Миним–Мартап в провинции Адамава Камеруна. Коренные породы плато перекрыты тонким слоем аллювия позднего плейстоцена–голоцена под которым залегают отложения латеритов и бокситов, сформированных на базальтах третичного и четвертичного времени. Гиббсит и бемит – гидроксиды алюминия установлены в бокситах, тогда как гетит является основным минералом гидроксидов железа. Образцы бокситовых пород с плато исследованы на предмет их химического состава с использованием метода XRF с учетом информации о материнских породах. Химическое исследование выявило средние концентрации основных компонентов руды в следующих соотношениях: Al₂O₃ (43.73%), Fe₂O₃ (24.53%), SiO₂ (2.12%) и TiO₂ (3.54%). В составе редких и рассеянных элементов присутствуют Zr (667.25 ppm), V (446.4 ppm), Ce (107.93 ppm), Sr (98.46 ppm), Nb (92.1 ppm), La (58.05 ppm), Ga (55.3 ppm), Ba (53.53 ppm), Nd (37.96 ppm) и ΣРЗЭ (245.8%). Расчеты показателя степени химического выветривания (Ruxton Ratio) и геохимического коэффициента (CIA) указывают на то, что породы плато подвергались процессу интенсивного выветривания, что и обусловило формирование промышленных месторождений бокситов. По результатам обработки данных химического состава бокситов с помощью трех независимых классификационных систем, месторождения плато могут быть отнесены к типу железистых бокситов. Изучение материнских пород показало, что бокситы формировались за счет магний-железистых андезитов-базальтов в условиях с близкой к нейтральным показателями окислительно-восстановительного потенциала.

Ключевые слова: химический процесс, геохимия окружающей среды, материнские породы, окисление алюминия.

DOI: 10.31857/S0024497X20030040

Месторождения бокситов классифицируются по составу подстилающих пород. Изначально Г. Бардози [Bárdossy, 1982] разделил их на латеритные (бокситы, залегающие на алюмосиликатных породах) и карстовые (залегающие на карбонатных комплексах независимо от того затронуты ли подстилающие породы процессами карстообразования). Позднее, в 1990-е годы месторождения бокситов были разделены на три основных группы: латеритные, тихвинского типа и карстовые. Бокситы тихвинского типа являются детритовыми (обломочными), перекрывающими эродированную поверхность алюмосиликатных пород. Многие месторождения латеритных бок-

ситов могут быть непосредственно отнесены к подстилающим их материнским породам и по особенностям текстуры, и по составу руд [Liu et al., 2010; Bárdossy, Aleva, 1990; Horbe, Costa, 1999; Mutakyahwa et al., 2003]. Однако для месторождений бокситов карстового типа такого рода элементы сходства редки вследствие сложности рудообразующего процесса.

Бокситоносный район Мартап относится к хорошо изученным в геологическом плане территориям. Это связано с нахождением в его границах крупного по запасам месторождения бокситов мирового класса Миним–Мартап. Географически месторождение тяготеет к границам двух на-

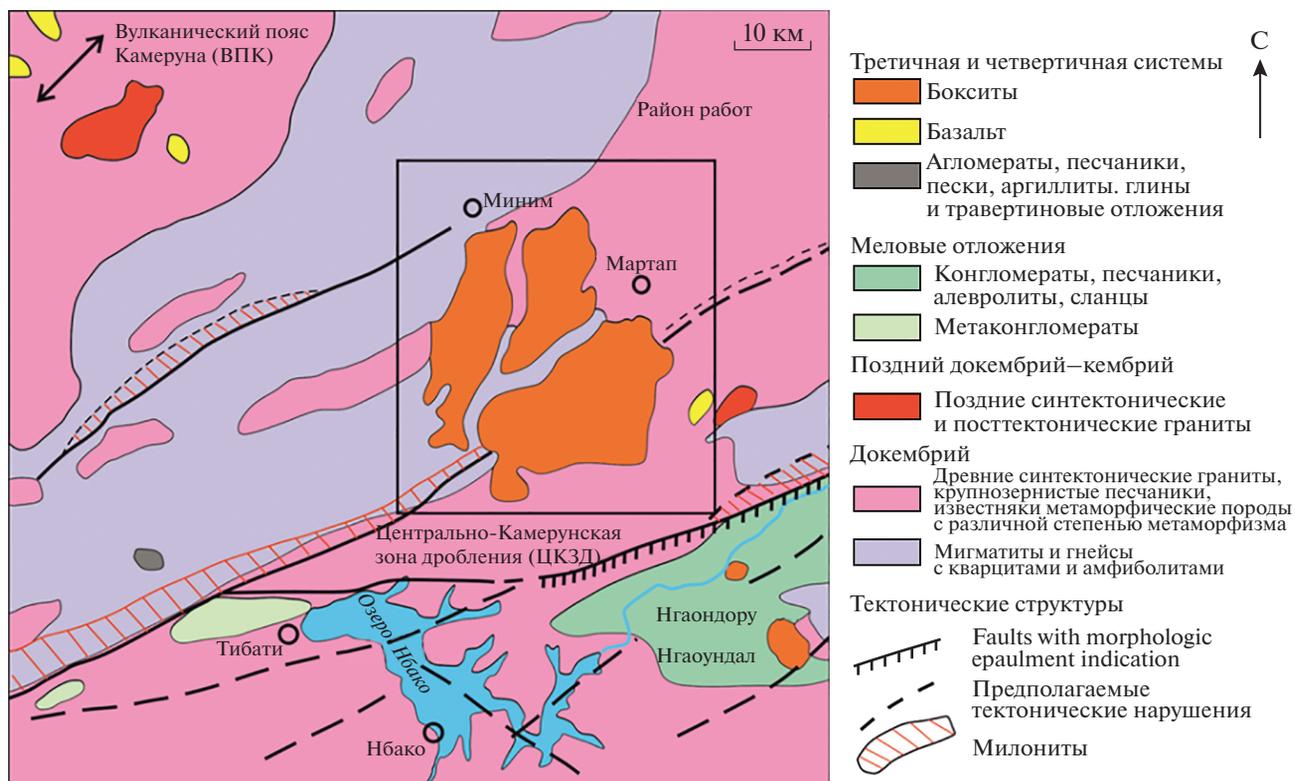


Рис. 1. Геологическая карта бокситоносного района Миним–Мартап.

селенных пунктов Мартап и Миним, расположенных на расстоянии около 50 км друг от друга. Бокситовые залежи встречаются в виде скопленных округлых в плане плато [CAL Executive Summary; Nyamsari, Yalçin, 2017]. Бокситы – это остаточные концентрации алюминия, образующиеся в результате выветривания богатых алюмосиликатами материнских пород в условиях влажного тропического и субтропического климата, где количество осадков превышает 1.2 м, а среднегодовая температура составляет 22°C [Bárdossy, Aleva, 1990]. В данной работе приведены результаты изучения геохимических особенностей, вещественного состава материнских пород, интенсивности процессов выветривания и латеритизации на плато Галео-Даниэлле – одном из одиннадцати латеритных бокситовых залежей месторождения Миним–Мартап (рис. 1).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геология

Бокситовое месторождение Галео-Даниэлле является частью бокситоносного рудного узла Миним-Мартап округа Мартап в районе Вина региона Адамава. Бокситоносный рудный район Миним-Мартап занимает значительную часть

плато Адамава, расположенного между Центрально-Камерунской сдвиговой зоной и Камерунской вулканической линией [Voaka et al., 2011]. Последняя простирается от побережья Атлантического океана на юго-западе страны в восточном направлении и оканчивается в гористой местности с высотными отметками от 1000 до 2500 м [Gwanfogbe et al., 1983]. Здесь же начинается плато Адамава, которое является большей, но менее расчлененной областью среди плато региона [Neba, 1999]. Панафриканская орогения привела к появлению в регионе Адамава множества гранитоидных интрузий. Метаморфизм и основные тектонические движения происходили по двум основным структурным зонам: Центрально-Камерунской сдвиговой зоне и Камерунской вулканической линии [Voaka et al., 2011]. В геологическом строении региона доминируют верхнепротерозойские гранитоиды, гнейсовые и метаосадочные пояса биримианско-эбурнианского возраста, а также кайнозойские вулканы и мигматиты. Снизу вверх по разрезу представлены породы фундамента, вулканогенно-осадочные отложения и слои почвы. Они частично покрыты базальтовыми потоками лав, варьирующих по возрасту от меловых до современных [Lasserge

1961; Temdjim et al., 2004] и имеющих типично щелочной состав [Nkouandou et al., 2008].

Бокситовое месторождение Миним–Мартап представляет собой скопление плато округлой формы площадью около 1000 км² с центром на 06°50' с.ш. и 12°55' в.д. Месторождение приурочено к центральной части плато, где оно образовалось в результате гипергенного выветривания вулканических пород и иммобилизации алюминия в палеогене. Этот процесс не только обусловил формирование месторождения Миним–Мартап, но и привел к образованию других важных в промышленном отношении залежей бокситов в районах Нгаондал и Нгаондору (см. рис. 1) [Eno Belinga, 1972, 1986]. Территория бокситового месторождения Миним–Мартап в ландшафтном плане представляет собой расчлененный базальтовый поток, который формирует относительно ровную поверхность плато, отчетливо воздымающуюся и обособленную от окружающих равнинных участков территории, сложенных гранитоидами.

Плато покрыто тонким слоем плейстоцен-четвертичного аллювия. Ниже залегают латериты, сформированные за счет третичных и четвертичных базальтов. Бокситы заключают в себе отвердевшие реликты преобразованных материнских пород в виде выпуклых образований, полностью покрывающих поверхность плато [CAL Executive Summary]. Мощность горизонта бокситов варьирует от 3 до свыше 30 м при средней мощности 8.6 м на плато Галео–Даниэлле. Породы горизонта уплотняются вблизи его поверхности. Пурпурные, белые, пестрые и пятнистые глины отмечаются повсеместно, хотя высокие содержания железа часто придают им иную окраску и могут затушевывать границы переходов одних в другие [CAL Executive Summary].

Пятнадцать образцов бокситов были отобраны из латеритов плато Галео–Даниэлле с учетом того, что бокситовые руды неравномерно распределены в рудоносном пласте и создают впечатление некоего химического перераспределения вещества. Была проведена пробоподготовка для определения валового химического состава в лаборатории университета Ак Дениз. Все образцы были раздроблены и истерты с использованием установки Retsch Mortar Grinder – RM 200 до 200 меш. Для отделения мельчайших зерен примесей истертый материал был просеян через 0.063-микронное сито. После этого были подготовлены навески по 15 г вещества. По ним в лаборатории ACME Analytical Laboratories, Ltd (номер регистрации – ANK15000466) рентгено-флюоресцентным анализом были определены concentra-

ции основных породообразующих, рассеянных и редкоземельных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Геохимия и статистика

На плато Галео–Даниэлле были отобраны образцы пизолитов (бокситов с оолитовой текстурой – “бобовая руда”). Образцы с номерами DBs (01, 02, 03, 04, 05 и 08) твердые и отличаются темно-коричневой до красно-коричневой окраской. Они сложены округлыми зернами и обладают пористой структурой. Образцы DBs (06, 09, 11 и 15) являются преимущественно мягкими, пористыми и глинистыми по структуре и отличаются красно-коричневой окраской. Образцы DBs (07, 12 и 14) плотные, зачастую обладают массивной порфириновой структурой и коричневой до красно-коричневой окраской. Образец 10 имеет отчетливо выраженную оолитовую структуру; он плотный и обладает коричневой окраской. Образец 13 также плотный, но обнаруживает порфириновую структуру и палево-коричневый окрас (рис. 2).

Минералогические особенности бокситов

Согласно минералогическим исследованиям бокситов прежних лет на плато Даниэлле [Kengne, 2013] бокситовые руды сложены гиббситом (Al(OH)₃), анатазом (TiO₂), бемитом (α – Al₂O(OH)₂), магнетитом (Fe₃O₄) и гетитом (FeO(OH)).

Данные геохимических анализов

Результаты рентгено-флюоресцентного анализа (XRF) образцов, отобранных на плато Галео–Даниэлле, приведены в табл. 1.

Основные породообразующие элементы

Средние значения содержаний основных рудообразующих элементов в руде составляют: Al₂O₃ – 43.73%, Fe₂O₃ – 24.53%, SiO₂ – 2.1% и связанного с анатазом TiO₂ – 3.54% (табл. 2). Содержание щелочных и щелочно-земельных элементов в бокситовой руде не превышает 1%. Содержание рудного компонента в оксиде алюминия изучено в 15 образцах и составляет: в трех образцах (20%) – до 40%, в восьми образцах (53.3%) – 40–50% и в четырех (26.7%) – свыше 52%.



Образцы пизолитовых бокситов



Образцы оолитовых бокситов



Глинистые бокситы



Панорама плато Даниэлле

Рис. 2. Образцы бокситов плато Даниэлле и фото района работ.

*Рассеянные элементы (микроэлементы)
и редкоземельные элементы (РЗЭ)*

В порядке уменьшения значений, средние концентрации рассеянных элементов составляют: Zr (667.25 ppm), V (446.4 ppm), Ce (107.93 ppm), Sr (98.46 ppm), Nb (92.1 ppm), La (58.05 ppm), Ga (55.3 ppm), Ba (53.53 ppm), Nd (37.96 ppm). Суммарные значения концентраций Σ РЗЭ в образцах варьируют от 109.1 до 448.6 ppm и в среднем составляют 245.8 ppm. Результаты анализа указывают на присутствие в кларковых значениях концентраций некоторых тяжелых металлов (Al, Fe) и радиоактивных элементов (U, Th).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Бокситовая руда плато Галео-Даниэлле состоит из двух гидроксидов алюминия – гиббсита и бемита. Их наличие указывает на вариации количества воды в ходе гипергенеза. Гиббсит более устойчив в гумидных обстановках, чем бемит [Tardy et al., 1988]. Бемит не является широко распространенным минералом в латеритах и мог образоваться в результате обезвоживания гиббсита [Chesworth, 1975; Trolard, Tardy, 1987, 1989; Mutakayahwa et al., 2003]. Процесс дегидратации мог проходить под воздействием сухих и жарких климатических условий во время периодов засухи.

Каолинит не был установлен в исследуемых образцах. Его отсутствие и, наоборот, присут-

ствие бемита, свидетельствует, что первичным минералом бокситов плато Галео-Даниэлле является гиббсит. Это подтверждает представление об образовании бемита за счет дегидратации гиббсита [Bland, Rolls, 1998]. Гиббсит в естественных условиях формируется преимущественно в результате процесса латеризации при преобразовании калиевого полевого шпата и глинистых минералов [Bárdossy, Aleva, 1990]. Отсутствие каолинита указывает также на хорошие дренажные условия в разрезе пород, при которых кремнезем достаточно быстро растворялся и выщелачивался, не имея возможности вступать в реакцию с алюминием для образования каолинита. Данное обстоятельство подтверждается имеющимися примерами процесса интенсивной латеритизации на участках плато в результате химического выветривания.

Наличие в породах гетита при отсутствии (недиагностируемости) гематита свидетельствует о климатических вариациях с периодическим наступлением влажных сезонов. Образование гетита можно связать со стадийным преобразованием амфиболов, начиная с появления нераскристаллизованного оксида железа [Bardossy, Aleva, 1990].

В большинстве (80%) изученных образцов содержание рудного компонента алюминия превышает 40%, что выше стандарта его содержаний в рудах, рентабельных в отработке. Это обстоятельство свидетельствует в пользу того, что рудные за-

Таблица 1. Результаты химических анализов образцов месторождения Галео-Даниэлле плато

	Место	Плато Даниэлле														
		образцы NN	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	DB8	DB9	DB10	DB11	DB12	DB13	DB14
Оксиды (%)	SiO ₂	4.59	2.28	1.83	5.38	1.43	0.86	5.75	2.00	0.83	1.18	1.36	0.75	1.39	0.85	1.14
	Al ₂ O ₃	21.86	41.39	40.77	28.91	46.27	43.02	43.28	43.98	41.51	37.11	55.73	56.65	54.03	48.66	52.79
	Fe ₂ O ₃	53.88	26.28	27.89	44.37	20.92	28.57	21.97	24.67	32.64	31.50	8.71	9.21	9.97	16.24	11.15
	CaO	0.05	0.04	0.04	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.03	<0.01	0.02	0.08	0.01	<0.01
	MgO	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.05	0.10	<0.01	<0.01	0.03	0.04	0.02
	Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	K ₂ O	<0.01	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01
	MnO	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	<0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.01	<0.01	0.02	0.02	0.03
	TiO ₂	2.58	2.88	2.46	2.46	2.88	2.20	3.39	3.21	4.05	8.28	3.04	1.31	3.08	5.91	5.41
	P ₂ O ₅	0.16	0.47	0.66	0.15	0.40	0.17	0.13	0.15	0.28	0.31	0.07	0.18	0.27	0.16	0.13
	Cr ₂ O ₃	0.125	0.118	0.134	0.090	0.112	0.080	0.117	0.087	0.145	0.208	0.058	0.067	0.057	0.104	0.072
	Ba	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.01
	LOI* (п.п.п.)	16.02	25.50	25.74	17.98	27.36	24.53	24.62	24.93	19.84	20.16	30.21	31.02	30.20	26.78	28.58
	ИТОГО	99.31	99.05	99.59	99.39	99.42	99.45	99.31	99.07	99.41	98.96	99.20	99.26	99.19	98.78	99.34
	Общ./С	0.51	0.35	0.50	0.13	0.33	0.29	0.18	0.22	0.39	0.36	0.11	0.12	0.35	0.26	0.12
	Общ./S	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Рассеянные элементы (PPM)	Va	28	48	38	13	29	28	42	45	11	35	47	85	260	41	53
	Be	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	3	<1	<1	<1	<1	<1	5
	Co	3.6	4.6	21.6	4.9	4.0	1.0	2.1	2.2	8.4	13.4	1.6	1.8	3.4	4.4	3.3
	Cs	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1
	Ga	41.9	56.9	50.1	42.4	56.7	53.2	62.7	64.7	51.1	81.0	45.5	39.9	45.6	62.6	75.3
	Hf	16.7	20.9	20.2	12.3	21.8	16.4	17.5	18.4	12.8	23.6	13.2	6.2	11.1	18.3	21.5
	Nb	80.5	108.1	97.6	76.9	111.2	95.0	90.0	115.9	57.3	142.6	80.1	34.2	65.4	95.8	130.9
	Rb	0.8	1.1	1.0	0.2	0.9	0.3	0.9	0.7	0.6	1.0	0.3	0.6	1.6	0.5	0.7
	Sn	7	9	9	6	10	8	7	9	6	13	6	3	7	9	11
	Sr	30.0	56.3	37.5	21.7	44.8	46.7	68.6	54.4	96.8	236.0	50.4	190.1	388.7	65.7	89.2
	Ta	4.8	7.0	6.0	4.8	6.7	5.5	5.7	7.2	3.7	7.7	4.7	2.3	3.7	5.7	5.4
	Th	26.0	31.2	29.5	17.6	31.6	19.5	27.6	27.3	17.9	23.7	12.7	11.0	18.1	26.9	25.6
	U	3.5	4.0	3.5	2.3	2.8	2.6	4.4	3.5	2.4	3.9	2.2	1.1	1.8	2.1	3.9
	V	655	476	352	679	311	433	486	547	526	758	170	193	243	581	286
	W	2.2	4.9	3.4	2.3	2.7	3.0	3.0	2.4	1.7	3.4	1.7	1.1	1.4	2.3	3.3
	Zr	667.3	859.9	800.1	505.5	874.9	673.0	686.0	743.0	474.3	923.1	531.0	250.0	460.6	706.1	854.0
	Mo	11.0	8.8	5.7	9.9	4.7	3.6	4.1	4.2	3.1	2.3	0.9	1.5	1.4	2.2	1.0
	Cu	27.8	5.3	4.4	30.7	2.9	13.1	6.1	12.0	17.2	24.9	3.6	9.3	7.3	4.2	2.4
	Pb	22.4	11.5	10.9	23.1	4.3	5.1	7.3	8.8	10.5	15.7	5.0	23.5	13.9	11.4	3.8
	Zn	7	16	10	7	8	1	5	5	15	22	2	10	9	8	2
	Ni	3.5	4.9	6.1	2.4	5.9	1.4	2.7	2.9	13.3	14.5	1.4	7.0	8.0	3.0	1.6
	As	25.0	13.8	15.6	16.3	14.7	9.0	6.9	9.5	5.6	1.2	1.2	3.1	1.2	2.9	1.3
	Cd	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.1	0.1
	Sb	3.4	5.9	2.7	1.2	1.8	1.2	0.7	1.2	0.9	0.5	0.7	0.5	0.4	1.3	0.4
	Bi	0.5	0.6	0.6	0.3	0.6	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.1	<0.1	0.1	0.3	0.2
	Ag	0.3	0.9	0.4	0.4	0.8	0.1	0.2	<0.1	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Au	8.3	2.1	1.7	1.0	1.7	0.9	3.2	4.4	1.8	2.6	4.4	2.2	2.0	1.9	6.3
	Hg	0.37	0.65	0.32	0.28	0.44	0.20	0.17	0.12	0.13	0.32	0.14	0.02	0.04	0.15	0.09
	Tl	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Se	<0.5	<0.5	<0.5	1.2	<0.5	0.9	<0.5	0.6	0.9	<0.5	<0.5	<0.5	0.7	0.6	<0.5

Таблица 1. Окончание

	Место	Плато Даниэлле														
	образцы NN	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	DB8	DB9	DB10	DB11	DB12	DB13	DB14	DB15
РЗЭ (PPM)	La	29.4	55.3	37.2	19.7	41.5	40.4	61.6	71.1	33.0	71.1	53.4	117.5	89.3	79.1	71.1
	Ce	62.7	139.5	67.7	61.9	71.5	70.7	107.2	123.8	74.8	137.6	89.0	206.0	144.5	123.3	138.7
	Pr	5.19	8.91	5.42	3.15	6.50	7.00	10.09	10.73	11.73	18.53	7.77	18.73	16.15	11.73	14.22
	Y	10.1	14.7	11.6	6.1	12.5	8.5	10.7	8.6	6.4	12.1	8.9	4.6	13.3	15.7	10.6
	Nd	16.7	27.8	17.1	10.8	19.9	23.3	31.4	31.8	56.8	86.6	24.8	71.6	67.1	38.9	44.8
	Sm	2.83	4.24	2.83	1.69	3.23	3.62	4.05	4.04	12.18	14.67	2.85	14.66	18.40	8.09	5.25
	Eu	0.61	0.85	0.55	0.29	0.62	0.78	0.75	0.73	2.18	2.56	0.51	2.50	4.87	1.43	0.99
	Gd	2.20	3.85	2.17	1.68	2.51	2.91	2.67	2.69	6.46	8.22	1.91	8.30	27.85	7.65	3.85
	Tb	0.33	0.51	0.35	0.20	0.36	0.40	0.35	0.35	0.74	0.91	0.27	0.73	3.53	1.14	0.47
	Dy	2.20	3.08	2.00	1.32	2.26	2.29	1.95	2.23	3.01	3.91	1.65	2.45	10.41	5.26	2.51
	Ho	0.43	0.61	0.42	0.26	0.46	0.39	0.44	0.36	0.33	0.61	0.32	0.23	0.85	0.68	0.43
	Er	1.32	1.62	1.39	0.76	1.55	1.06	1.33	1.14	0.79	1.46	0.93	0.55	1.33	1.81	1.10
	Tm	0.23	0.30	0.23	0.14	0.24	0.18	0.19	0.20	0.12	0.26	0.16	0.09	0.19	0.23	0.20
	Yb	1.68	1.88	1.52	1.01	1.90	1.24	1.41	1.52	1.05	1.81	1.07	0.58	1.35	1.63	1.36
	Lu	0.28	0.35	0.25	0.14	0.26	0.19	0.20	0.24	0.13	0.27	0.16	0.09	0.21	0.24	0.21
	ΣРЗЭ	136.2	263.5	150.7	109.1	165.3	163.0	234.3	259.5	209.7	360.6	193.7	448.6	399.3	296.9	295.8

Примечание. *LOI (п.п.п.) – потери при прокаливании.

лежи плато соответствуют международному стандарту качества для данного вида минерального сырья.

По сравнению со стандартными средними содержаниями основных элементов бокситов – больше 40% Al₂O₃, менее 20% Fe₂O₃ и менее 8% общего SiO₂ [Valeton, 1972; Bardossy, Aleva, 1990], образцы с плато Галео-Даниэлле характеризуются относительно высоким средним содержанием Fe₂O₃ (24.53), указывающим на значительную примесь Fe₂O₃ в бокситовой руде.

Несмотря на высокую концентрацию РЗЭ, минералы-носители редкоземельных элементов не были диагностированы. Такие минералы не доступны для диагностики методом рентгеновской дифрактометрии, когда их концентрация в образцах < 4% [Calagari et al., 2010]. Известно, что РЗЭ накапливаются в минералах-концентракторах, таких, как глинистые минералы, оксиды-гидроксиды железа и марганца, фосфаты (апатит), а также в ряде породообразующих минералов – гранате, цирконе, титаните [Banifield, Eggleton, 1989; Burt, 1989; Clark, 1984; Hanilçi, 2013; Nyamsari, Yalçin, 2017]. Следовательно, коэффициент корреляции некоторых основных оксидов и микроэлементов с РЗЭ может дать информацию о возможных минералах, содержащих РЗЭ.

Поскольку значимая корреляционная связь между большинством из основных оксидов (SiO₂,

CaO, MgO, MnO, P₂O₅ и Cr₂O₃) и РЗЭ не установлена, оксиды не являются концентраторами РЗЭ. Отрицательная корреляционная зависимость между Fe₂O₃ и La, Ce и Pr показывает, что Fe₂O₃ не является концентратором РЗЭ, но влияет на их распределение. Умеренная корреляционная зависимость между Al и Ce, Al и Pr, а также TiO₂ и Nd свидетельствует, что гидроксиды играют несущественную роль в накоплении РЗЭ, в то время как значимая положительная связь между Al₂O₃ и La показывает, что минералы глины в бокситах являются концентраторами РЗЭ [Hanilçi, 2013]. Результаты исследования корреляционной зависимости между элементами в образцах с плато Галео-Даниэлле представлены в табл. 3.

Изменение пород в процессе химического выветривания

Условия формирования бокситов описаны многими авторами [Valeton, 1972; Bárdossy, 1982; Bárdossy, Aleva, 1990; Bogatyrev et al., 1987, 2009; Öztürk et al., 2002; Retallack, 2010; Hanilçi, 2013]. Латеритные бокситы образуются в основном за счет химического разложения алюмосиликатных минералов с последующим выносом щелочных и щелочноземельных элементов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺) и отторжением алюминия от кремния. В итоге, химическое выветривание силикатных пород при гидролизе приводит к обмену катионов Na⁺, K⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺ на H⁺, и, вероятно, к по-

Таблица 2. Результаты исследования статистических параметров распределения элементов в исследуемых образцах плато Даниэлле с использованием ЭВМ

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	LOI	Zr	V	Ce	Sr	Nb	La	Ga
<i>N</i>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Minimum	21.86	8.71	1.31	0.75	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	16.02	250.00	170.00	61.90	21.70	34.20	19.70	39.90
Maximum	56.65	53.88	8.28	5.75	0.66	0.21	0.10	0.06	0.08	31.02	923.10	758.00	206.00	388.70	142.60	117.50	81.00
Среднее	43.73	24.53	3.54	2.11	0.25	0.10	0.02	0.02	0.02	24.90	667.25	446.40	107.93	98.46	92.10	58.05	55.31
Стд. отклонение	9.60	13.00	1.76	1.69	0.16	0.04	0.03	0.02	0.02	4.57	189.85	182.61	41.59	99.82	28.14	25.98	12.20
	Ba	Nd	Th	Hf	Pb	Cu	Pr	Y	As	Zn	Sn	Sm	Gd	Ta	Co	Ni	Mo
<i>N</i>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Minimum	11.00	10.80	11.00	6.20	3.80	2.40	3.15	4.60	1.20	1.00	3.00	1.69	1.68	2.30	1.00	1.40	0.90
Maximum	260.00	86.60	31.60	23.60	23.50	30.70	18.73	15.70	25.00	22.00	13.00	18.40	27.85	7.70	21.60	14.50	11.00
Среднее	53.53	37.96	23.08	16.73	11.81	11.41	10.39	10.29	8.49	8.47	8.00	6.84	5.66	5.39	5.35	5.24	4.29
Стд. отклонение	59.76	22.79	6.52	4.79	6.76	9.49	4.84	3.17	7.24	5.71	2.42	5.41	6.58	1.46	5.47	4.08	3.25
	Mo	Dy	U	W	Sb	Yb	Eu	Er	Rb	Tb	Ho	Bi	Hg	Ag	Lu	Tm	
<i>N</i>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	
Minimum	0.90	1.32	1.10	1.10	0.40	0.58	0.29	0.55	0.20	0.20	0.23	0.00	0.02	0.00	0.09	0.09	
Maximum	11.00	10.41	4.40	4.90	5.90	1.90	4.87	1.81	1.60	3.53	0.85	0.60	0.65	0.90	0.35	0.30	
Среднее	4.29	3.10	2.93	2.59	1.52	1.40	1.35	1.21	0.75	0.71	0.45	0.33	0.23	0.22	0.21	0.20	
Стд. отклонение	3.25	2.24	0.96	0.97	1.48	0.37	1.22	0.35	0.36	0.82	0.17	0.19	0.17	0.29	0.07	0.05	

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между 48 элементами в образцах с плато Даниэлле

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	LOI	BaI	Co	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	
SiO ₂	1																				
Al ₂ O ₃	-.635*	1																			
Fe ₂ O ₃	.567*	-.987**	1																		
CaO	-.044	-.171	.164	1																	
MgO	-.072	-.324	.289	.341	1																
MnO	-.031	-.363	.316	.286	.738**	1															
TiO ₂	-.245	-.010	-.049	-.074	.820**	.620*	1														
P ₂ O ₅	-.187	-.125	.111	.184	.526*	.184	.526*	1													
Cr ₂ O ₃	.079	-.549*	.522*	.183	.810**	.723**	.578*	.448	1												
LOI	-.200	.471	-.492	.623*	-.090	-.468	-.397	.007	-.618*	1											
BaI	-.114	-.266	.248	.333	.499	.839**	.280	.769**	-.432	.515*	1										
Co	-.200	.085	-.156	-.322	.496	.822**	.010	.458	-.005	-.005	-.199	1									
Hf	-.019	-.253	.169	-.124	.352	.540*	.558*	.390	-.184	-.184	-.372	.370	1								
Nb	-.063	-.152	.067	.247	.330	.518*	.631*	.184	.419	-.113	-.287	.240	.852*	1							
Rb	-.049	.093	-.158	.765**	.307	.305	.127	.525*	.217	.189	.661**	.283	.165	.935*	1						
Sn	-.200	-.134	.056	-.038	.502	.636*	.724**	.320	.523*	-.115	-.164	.377	.849*	.931*	.954*	1					
Sr	-.332	.392	-.401	.595*	.390	.122	.247	.018	-.034	.322	.844**	.022	.054	-.294	-.182	.631*	1				
Ta	.062	-.284	.201	-.202	.267	.455	.463	.324	.510	-.207	-.368	.277	.703*	.906*	.906*	.162	.846*	1			
Th	-.195	-.320	.232	.049	.128	.342	.227	.494	.418	-.173	-.253	.287	.499	.845*	.676*	.395	.680*	-.352	.768*		
U	.392	-.408	.321	.121	.251	.412	.343	.232	.511	-.345	-.357	.262	.629*	.795*	.735*	.275	.645*	-.317	.732*		
V	.426	-.808**	.779**	-.013	.609*	.454	.452	-.041	.682**	-.870**	-.458	.218	.316	.354	.338	-.123	.344	-.213	.452		
W	.122	-.275	.201	-.078	.168	.357	.252	.494	.427	-.160	-.347	.313	.538*	.798*	.723*	.212	.666*	-.335	.764*		
Zr	-.005	-.253	.167	-.113	.302	.508	.509	.396	.508	-.164	-.344	.339	.740*	.996*	.941*	.249	.925*	-.295	.918**		
Y	-.114	-.309	-.166	.327	.308	.268	.433	.385	.228	-.180	-.244	.187	.427	.641*	.531*	.569*	.632*	.135	.556*		
La	-.431	.704**	-.730**	.053	-.011	-.242	.159	-.202	-.288	.675**	.563*	-.249	.187	-.269	-.138	.301	-.097	.639*	-.246		
Ce	-.364	.591*	-.617*	.084	.054	-.161	.172	-.129	-.194	.560*	.477	-.221	.222	-.221	-.088	.314	-.067	.599*	-.194		
Pr	-.505	.541*	-.545*	.163	.405	.078	.469	-.142	.068	.394	.479	-.048	.388	-.152	-.023	.366	.090	.778*	-.199		
Nd	-.488	.391	-.378	.282	.575*	.217	.511	-.062	.237	.211	.441	.088	.326	-.179	-.071	.370	.084	.822*	-.219		
Sm	-.465	.380	-.353	.509	.494	.126	.320	.008	.109	.230	.638*	.070	.059	-.364	-.300	.464	-.094	.913**	-.395		
Eu	-.396	.380	-.364	.634*	.398	.077	.216	.029	-.028	.277	.814**	.018	-.028	-.374	-.309	.587*	-.100	.966*	-.403		
Gd	-.300	.380	-.384	.679**	.262	.012	.120	.030	-.193	.339	.927**	-.051	-.102	-.351	-.286	.636*	-.091	.927*	-.366		
Tb	-.279	.356	-.368	.683**	.253	.020	.132	.045	-.201	.330	.924**	-.045	-.090	-.292	-.241	.646*	-.045	.882*	-.312		
Dy	-.307	.324	-.347	.669**	.312	.059	.230	.069	-.135	.303	.872**	-.032	-.008	-.167	-.132	.654*	.071	.832*	-.194		
Ho	-.189	.128	-.208	.585*	.449	.237	.444	.255	.152	.177	.612*	.102	.315	.327	.293	.726*	.465	.576*	.274		
Er	-.012	-.122	.017	.253	.328	.295	.423	.406	.375	.007	.057	.231	.455	.730*	.587*	.502	.673*	-.016	.672*		
Tm	.034	-.277	.175	.250	.320	.410	.388	.488	.454	-.119	-.067	.291	.500	.848*	.745*	.489	.775*	-.104	.812**		
Yb	.065	-.337	.245	.229	.360	.418	.420	.437	.514*	-.214	-.113	.257	.524*	.867*	.745*	.481	.793*	-.126	.827*		
Lu	.075	-.335	.244	.310	.253	.350	.283	.481	.418	-.166	-.049	.242	.415	.793*	.678*	.516*	.699*	-.125	.770*		
Mo	.686**	-.856**	.835**	.219	-.054	.107	-.352	.240	.239	-.693**	-.361	.104	-.335	.139	.005	-.037	-.064	-.495	.206		
Cu	.437	-.793**	.821**	.145	.427	.292	.096	-.203	.408	-.863**	-.264	.095	-.156	-.148	-.086	-.238	-.085	-.020	-.045		
Pb	.342	-.457	.461	.415	.230	.105	-.164	-.042	.137	-.424	.099	.095	-.461	-.479	-.470	.003	-.424	.225	-.400		
Zn	-.162	-.236	.226	.502	.766**	.610*	.443	.533*	.766**	-.308	-.003	.545*	.227	.194	.107	.438	.269	.376	.213		
Ni	-.337	-.063	.100	.503	.749**	.557*	.423	.410	.670**	-.222	.130	.516*	.175	.013	-.049	.424	.163	.553*	-.028		
As	.566*	-.785**	.781**	.200	-.201	.052	-.471	.322	.188	-.591*	-.384	.151	-.388	.175	-.004	-.032	-.056	-.568*	.191		
Sb	.205	-.433	.406	.324	-.093	.051	-.266	.540*	.216	-.241	-.220	.165	-.163	.339	.141	.225	.115	-.396	.348		
Bi	.236	-.574*	.539*	.150	.050	.351	-.059	.656**	.488	-.412	-.441	.181	.129	.677*	.454	.212	.458	-.536*	.659**		
Ag	.279	-.375	.341	.213	-.087	.123	-.266	.622*	.266	-.195	-.268	.181	-.106	.399	.206	.226	.191	-.376	.408		
Hg	.253	-.541*	.493	.214	.145	.279	-.022	.579*	.478	-.377	-.380	.271	.065	.574*	.404	.193	.386	-.395	.594*		

Таблица 3. Окончание

Ta	Th	U	V	W	Zr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Sb	Bi	Ag	Hg	
1																															
.768**	1																														
.732**	.738**	1																													
.452	.318	.399	1																												
.764**	.724**	.784**	.289	1																											
.918**	.849**	.795**	.331	.820**	1																										
.556*	.681**	.367	.088	.518*	.646**	1																									
-.246	-.257	-.305	-.398	-.275	-.272	.089	1																								
-.194	-.221	-.188	-.298	-.094	-.217	.054	.944**	1																							
-.199	-.294	-.178	-.170	-.222	-.179	.030	.854**	.856**	1																						
-.219	-.359	-.215	-.042	-.258	-.213	-.023	.701**	.716**	.957**	1																					
-.395	-.419	-.422	-.111	-.414	-.391	.010	.657**	.635*	.862**	.932**	1																				
-.403	-.376	-.419	-.187	-.414	-.386	.111	.599*	.553*	.759**	.821**	.957**	1																			
-.366	-.285	-.416	-.241	-.383	-.346	.257	.535*	.459	.596*	.629*	.827**	.950*	1																		
-.312	-.213	-.382	-.221	-.346	-.286	.344	.478	.387	.521*	.551*	.763**	.909*	.991*	1																	
-.194	-.093	-.313	-.139	-.249	-.163	.479	.463	.373	.506	.527*	.727**	.868*	.961*	.984*	1																
.274	.361	.120	.079	.230	.333	.856**	.286	.241	.327	.327	.438	.570*	.690*	.750*	.841*	1															
.672**	.801**	.463	.258	.556*	.730**	.959**	-.027	-.071	-.081	-.119	-.106	-.034	.090	.179	.325	.757*	1														
.812**	.828**	.658**	.315	.776**	.867**	.854**	-.153	-.089	-.149	-.174	-.236	-.175	-.080	-.010	.126	.616*	.899**	1													
.827**	.876**	.651**	.387	.664**	.875**	.817**	-.232	-.209	-.182	-.184	-.233	-.173	-.087	-.012	.123	.591*	.906**	.956**	1												
.770**	.836**	.661**	.325	.743**	.816**	.801**	-.171	-.094	-.183	-.212	-.253	-.179	-.081	-.013	.117	.580*	.858*	.981*	.945*	1											
.206	.375	.318	.531*	.349	.170	-.002	-.651**	-.494	-.694**	-.620*	-.540*	-.485	-.402	-.372	-.350	-.152	.132	.311	.307	.400	1										
-.045	-.228	.009	.743**	-.139	-.154	-.414	-.406	-.302	-.154	.035	.037	-.015	-.101	-.132	-.158	-.230	-.296	-.150	-.092	-.108	.538*	1									
-.400	-.333	-.318	.369	-.315	-.476	-.321	.095	.194	.102	.197	.297	.242	.180	.124	.074	-.110	-.287	-.240	-.286	-.182	.455	.684**	1								
.213	.134	.125	.419	.250	.167	.216	.089	.248	.396	.557*	.526*	.406	.238	.196	.229	.327	.236	.312	.297	.298	.107	.298	.376	1							
-.028	-.101	-.063	.227	-.087	-.031	-.006	.129	.191	.529*	.722**	.719**	.608*	.400	.342	.327	.235	.000	.005	.071	-.012	-.191	.273	.249	.865**	1						
.191	.439	.279	.362	.263	.204	-.026	-.679**	-.602*	-.768**	-.711**	-.614*	-.550*	-.464	-.428	-.414	-.233	.143	.289	.330	.387	.926**	.399	.315	-.040	-.233	1					
.348	.547*	.376	.193	.629*	.375	.392	-.358	-.180	-.460	-.462	-.412	-.367	-.291	-.252	-.176	.147	.439	.625*	.523*	.705**	.719**	-.008	.112	.264	-.120	.670**	1				
.659**	.841**	.578*	.376	.658**	.689**	.424	-.602*	-.524*	-.602*	-.563*	-.555*	-.520*	-.454	-.391	-.302	.094	.585*	.704**	.752**	.745**	.665**	.031	-.145	.222	-.016	.751**	.747**	1			
.408	.577*	.331	.109	.601*	.434	.323	-.471	-.310	-.521*	-.483	-.435	-.392	-.323	-.296	-.256	.056	.390	.541*	.528*	.561*	.658*	-.037	-.010	.280	-.015	.652*	.773*	.784*	1		
.594*	.623*	.493	.351	.737**	.603*	.431	-.511	-.332	-.485	-.421	-.441	-.428	-.387	-.352	-.272	.150	.521*	.733*	.688*	.746*	.700*	.128	.029	.400	.039	.648*	.852*	.828*	.908*	1	

Примечание. Двусторонняя корреляция является значимой на уровне: ** — 0.01, * — 0.05.

Таблица 4. Рассчитанные показатели химического индекса изменения (CIA) образцов

		Химический индекс изменения (CIA)														
Даниэлле	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	DB8	DB9	DB10	DB11	DB12	DB13	DB14	DB15	
CIA	98.7	97.5	96.4	98.8	98.0	99.1	99.3	99.2	98.5	98.2	99.7	99.3	99.0	99.3	99.4	

тере Si⁴ [Kramer, 1968]. В данной работе химический индекс изменения (CIA) использован для оценки профиля выветривания или степени химического преобразования породы. Индекс CIA [Nesbitt, Young, 1982] показывает отношение преимущественно неподвижного Al₂O₃ к мобильным Na⁺, K⁺ и Ca²⁺ в форме оксидов. Он принимается как наиболее приемлемый среди различных показателей степени выветривания [Bahlburg, Dobrzinski, 2009]. Во многих исследованиях палеопочв CIA позволяет оценить количественно степень преобразования калиевого полевого шпата, который преобладает в породах верхней части коры, в глины, такие, как например, каолин [Jason, Velbel, 2003].

Величина CIA рассчитывается по формуле:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O},$$

где оксиды основных породообразующих элементов даны в молекулярных пропорциях, CaO* – это содержание CaO только в минералах силикатов [Fedo et al., 1995]. Исходя из данных по анализируемым элементам, в настоящее время нет доказательств присутствия первичных карбонатов, но, поскольку на месторождении установлен апатит, принимаем: CaO* = mol CaO – 10/3 mol P₂O₅.

В силу того, что все оценочные показатели по CaO* были отрицательны, их унифицировали перед тем, как использовать в уравнении. Показатели CIA ≤ 50 представляют оптимум для неизменных разностей пород, а CIA = 100 представляет оптимальный показатель степени выветривания.

Показатели CIA для отобранных образцов приведены в табл. 4 и составляют 96.4 (минимальное), 99.7 (максимальное) и 98.7 (среднее). Это свидетельствует о том, что породы плато подверг-

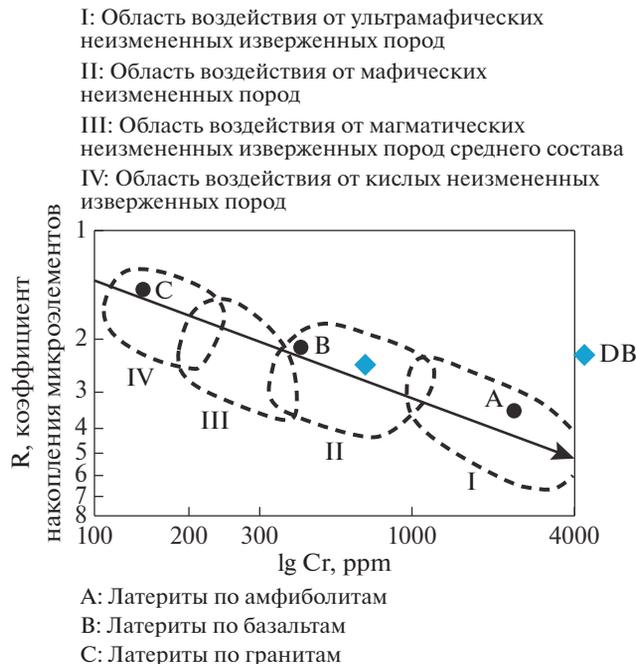


Рис. 3. Логарифм Cr относительно значений коэффициента накопления R [Özlu, 1983]. Точки А, В и С – латериты по амфиболитам, базальтам и гранитам, соответственно. Номера I, II, III и IV – области влияния ультраосновных, основных, средних (или глинистых) и кислых первичных пород соответственно.

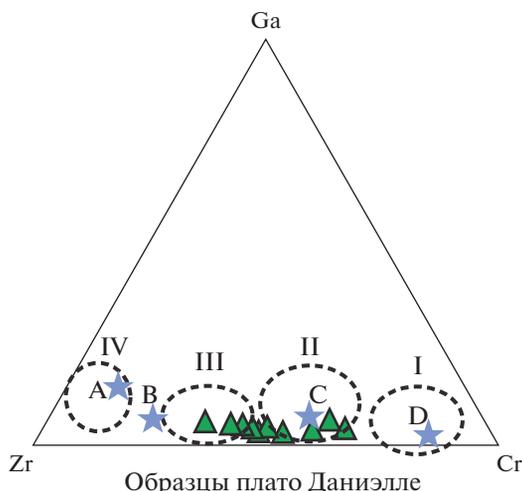


Рис. 4. Тройная диаграмма, показывающая концентрации Ga, Zr и Cr в бокситах района Миним-Мартап [Özlu, 1983]. Точки A, B, C и D (отмечены звездочками) – области значений концентраций Zr, Cr и Ga в ультросновных, основных, средних и кислых породах, соответственно. I, II, III и IV – области влияния ультросновных, основных, средних (или глинистых) и кислых первичных пород, соответственно. Треугольники – значения в образцах с плато Галео-Даниэлле.

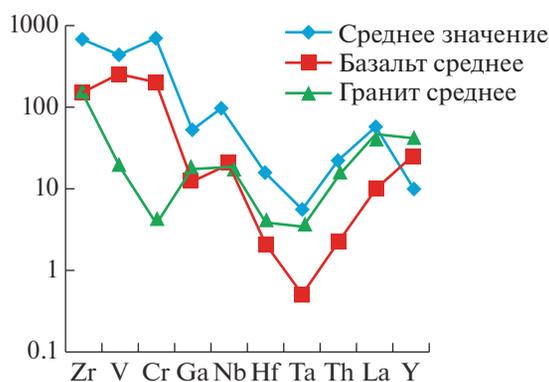


Рис. 5. Средние содержания малоподвижных рассеянных элементов в породах плато Даниэлле (ромбы) относительно таковых в базальтах (квадраты) и гранитах (треугольники) (по [Taylor, 1964]).

лись интенсивному химическому преобразованию вследствие химического выветривания.

Петрогенезис латеритных руд

Логарифм значений Cr относительно коэффициента накопления (R) показывает, что данные по плато Галео-Даниэлле на графике близки или приближаются к неизменным базальтам (точка B) в области мафических материнских пород (рис. 3).

Тройная диаграмма Ga, Zr и Cr (рис. 4) указывает на то, что данные для плато Галео-Даниэлле ближе по положению к точке C (близнеутральные значения pH) в области исходных пород основного состава. Данные графика расположены

преимущественно в области влияния мафических пород и между мафическими и средними глинистыми первичными породами.

Средние содержания относительно стабильных рассеянных элементов (Zr, V, Cr, Ga, Nb, Hf, Ta и Th) и РЗЭ (La и Y) в образце плато Даниэлле выше, чем в базальтах и гранитах (рис. 5). Содержания V и Cr сходны с базальтами, а Ta, Th и La ближе к гранитам, что указывает на средний состав материнской породы и подтверждает интерпретацию тройной диаграммы Ga–Zr–Cr.

Классификация месторождений

На трехкомпонентном графике $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ 66.3% составов образцов группируются в

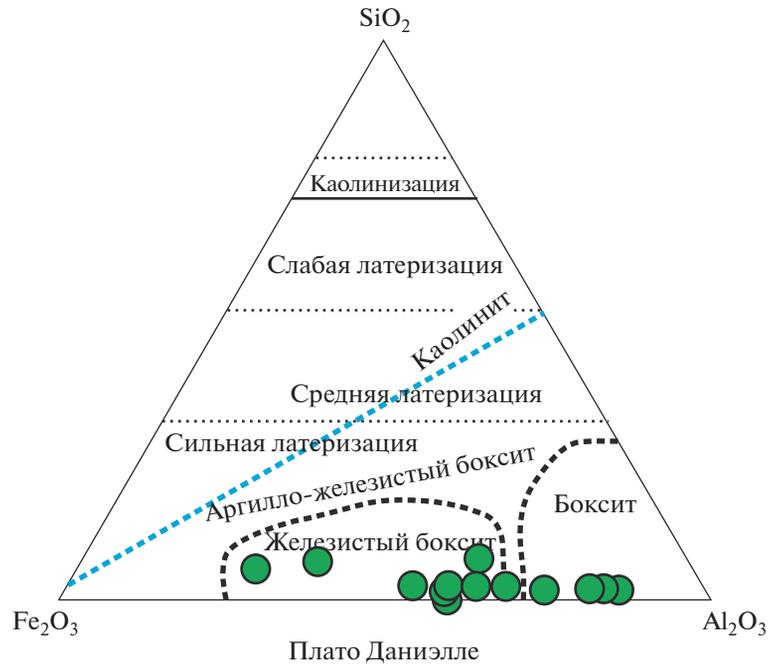


Рис. 6. Трёхкомпонентный график $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ [Boulangé et al., 1996; Schellmann, 1982]. Кружки – данные по образцам плато Даниэлле.

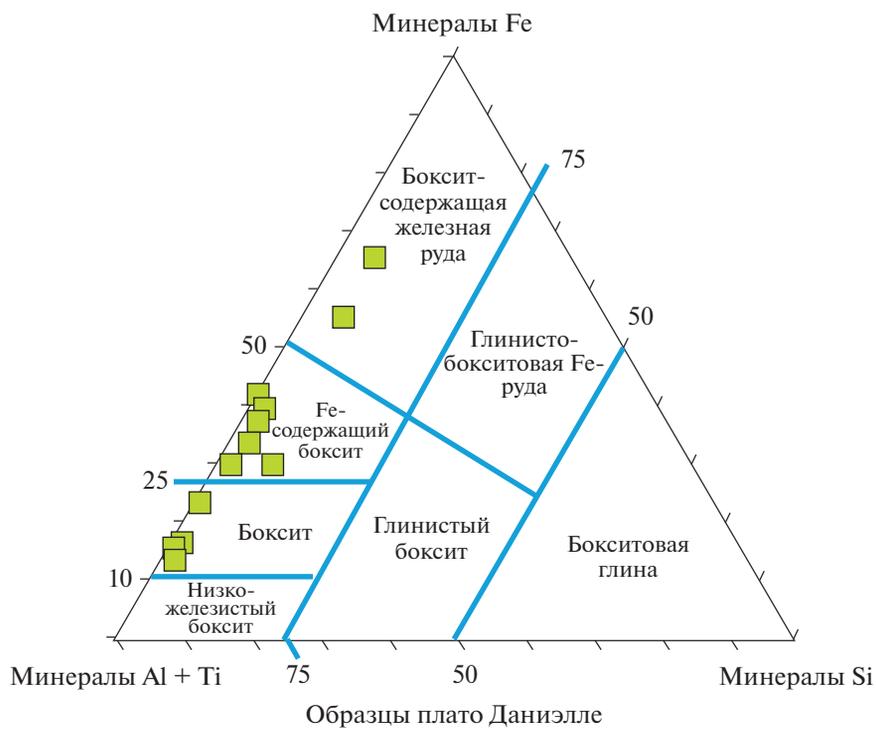


Рис. 7. Тройная диаграмма $\text{Fe}\text{--}(\text{Al} + \text{Ti})\text{--}$ глинистые минералы [Bárdossy, 1982]. Квадраты – данные по образцам плато Даниэлле.

поле железистых бокситов и 33.3% в поле бокситов (рис. 6).

Во всех образцах отмечается отчетливые признаки процесса латеритизации. На трехкомпонентном графике Fe–(Al + Ti)–глинистые минералы 33.3% точки составов изученных образцов тяготеют к полю бокситов, 53.3% – к полю обогащенных железом бокситов и 13.3% – к полю железисто-бокситовых руд (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Залежи плато Даниэлле сложены двумя гидроксидными алюминия – гиббситом и бемитом. Бемит, вероятно, формировался при дегидратации гиббсита. Среднее содержание Al_2O_3 43.73% в залежах немного превышает принятые стандартные значения для промышленных объектов, что позволяет классифицировать их как железисто-бокситовое месторождение. Материнскими породами бокситов служили магний-железистые андезиты-базальты со средними значениями рН.

Минералы-источники редкоземельных элементов не были установлены, но обнаруженные РЗЭ входят в состав породообразующих компонентов. Глинистые минералы играют основную роль в накоплении РЗЭ. Породы плато подверглись интенсивному химическому преобразованию благодаря климатическому фактору. Они обнаруживают сильную латеритизацию, которая привела к накоплению концентраций малоподвижных элементов и их соединений, таких как Al, Ti и некоторых рассеянных химических элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование проводилось по программе работ научно-исследовательского проекта университета Акдениз (Анталья, Турция). Авторы благодарят руководство проекта за финансовую поддержку. Авторы не ставили своей целью сопоставление полученных результатов исследования с имеющимися у работающих в бокситоворудном районе Миним–Мартап производственных организаций из-за разницы в методах отбора проб и их аналитической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bahlburg H., Dobrzinski N. A review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions // *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. London: Geological Society Memoirs, 2011. V. 36. P. 81–92.

Banifild J.F., Eggleton R.A. Apatite replacement and REE mobilization, ractionation, and fixation during weathering // *Clays and Clay Minerals*. 1989. V. 37. P. 113–127.

Bárdossy G., Aleva G.J.J. Lateritic bauxites: Developments in Economic Geology. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication, 1990. V. 27. 624 p.

Bárdossy G. Karst bauxites: Bauxite Deposits on Carbonate Rocks. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication, 1982. 441 p.

Bland W., Rolls D. Weathering: An introduction to the scientific principles. London: Arnold Publishers, 1998. 271 p.

Boaka M.L., Fouateu R.Y., Giuliani G. Mineralogical Features and Geological Origin of the Sapphires from the Mayo Kewol Paleoplacer in the Adamawa region (North-Cameroon), in book: *Advances in Materials Science Research*. Chapter: 7, Publisher: Nova Science Publishers, Inc, Editors: *Maryann C. Wythers*, 2011. P. 125–142.

Bogatyrev B.A., Demina V.N., Zhukov V.V. Formation factors and ore material sources of bauxites // *Exogenic Ore Formation: Al, Ni, Mn*. M.: Nauka, 1987. P. 112–119.

Bogatyrev B.A., Zhukov V.V., Tsekhovskiy Yu.G. Formation conditions and regularities of distribution of large and superlarge bauxite deposits // *Lithology and Mineral Resources*. 2009. V. 44(2). P. 135–151.

Boulangé B., Bouzat G., Pouliquen M. Mineralogical and geochemical characteristics of two bauxitic profiles, Fria, Guinea Republic // *Mineralium Deposita*. 1996. V. 31(5). P. 432–438.

Burt D.M. Compositional and phase relations among rare earth element minerals / Eds B.R. Lipin, G.A. McKay. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. Washington D.C.: Mineralogical Society of America, 1989. P. 259–307.

CAL Executive Summary: Environmental and Social Impact Assessment Study for the Proposed Bauxite Mining Project at Minim-Martap&Ngaoundal Deposits, Adamawa Region, Republic of Cameroon, VIMTA Labs Limited, India Rainbow Environment Consult, Cameroon, (<http://www.cameroonalumina.com/ExecutiveSummary-English.pdf>).

Calagari A.A., Kangarani F., Abedini A. Geochemistry of major, trace, and rare earth elements in Biglar Permo-Triassic bauxite deposit, Northwest of Abgarm, Ghazvin Province, Iran // *J. Sci., Islamic Republic of Iran*. 2010. V. 21(3). P. 225–236.

Chesworth W. The system SiO_2 – $AlOOH$ – Fe_2O_3 – H_2O and the kaolinitic stage of the goethite facies // *Clays and Clay Minerals*. 1975. V. 23. P. 389–392.

Clark A.M. Mineralogy of the rare earth elements / Ed. P. Henderson. *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam, Oxford, N. Y.: Elsevier, 1984. P. 33–61.

Eno Belinga S.M. Il ya 600 millions d’années. Paléoclimats et métaux, nonmétaux et substances minérales utiles du Cameroun // *Alitaf Yaoundé*, 1986. 128 p.

Eno Belinga S.M. L’altération des roches basaltiques et le processus de bauxitisation dans l’Adamaoua (Cameroun) // *Thèse Doc. d’Etat. Univ. de Paris*. 1972. V. VI. 571 p.

- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M.* Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*. 1995. V. 23. P. 921–924.
- Gwanfogbe M., Meligui A., Moukam J., Nguoghia J.* Geography of Cameroon. V. 8. Hong Kong: Macmillan Education, 1983. P. 12–19.
- Haniçli N.* Geological and geochemical evolution of the Bolakdagi bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite // *J. Geochem. Exploration*. 2013. V. 133. P. 118–137.
- Horbe A., Costa M.* Geochemical evolution of a lateritic Sn–Zr–Th–Nb–Y–REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas-Brazil // *J. Geochem. Exploration*. 1999. V. 66. P. 339–351.
- Jason R.P., Velbel A.M.* Chemical Weathering indices applied to Weathering Profiles developed on Heterogeneous felsic metamorphic parent rock // *Chemical Geology*. 2003. V. 202. P. 397–416.
- Kengne E.* Effets De L'ajout De La Bauxite Et De La Coquille D'huitre Sur Les Propriétés De Ciments Geopolymères A Base De Metakaolin // Mémoire présenté et soutenu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en chimie. Dept. Inorg. Chem. Faculty of Science, University of Yaounde I. 2013. P. 34–37.
- Kramer J.R.* Mineral-water equilibria in silicate weathering // *Int. Geol. Congr.* 1968. 23rd Section. V. 6. P. 149–160.
- Lasserre M.* Contribution to the geological study of Africa. Study of the eastern part of Adamaoua (Central Cameroon) // *Bull. Dir. Min. Géol. French*. 1961. V. 4. P. 1–131.
- Liu X., Qingfei W., Jun D. et al.* Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China // *J. Geochem. Exploration*. 2010. V. 105. P. 137–152.
- Mutakyahwa M.K.D., Ikingura J.R., Mruma A.H.* Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania // *J. African Earth Sci.* 2003. V. 36. P. 357–369.
- Neba A.* Modern Geography of the Republic of Cameroon. Bamenda: Neba Publishers, 1999. 269 p.
- Nkouandou O.F., Ngounouno I., Déruelle B. et al.* Petrology of the Mio-Pliocene Volcanism to the North and East of Ngaoundéré (Adamawa-Cameroon), C. R. // *Géoscience*. 2008. V. 340. P. 27–38.
- Nyamsari D.G., Yalçin M.G.* Statistical analysis and source rock of the Minim-Martap plateau bauxite, Cameroon // *Arab. J. Geosci.* 2017. V. 10(18). P. 415–431.
- Özlü N.* Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt // *Mineralium Deposita*. 1983. V. 18. P. 469–476.
- Öztürk H., Hein J.R., Haniçli N.* Genesis of the Dogankuzu and Mortas bauxite deposits, Taurides, Turkey separation of Al, Fe and Mn and implications for passive margin metallogeny // *Economic Geology*. 2002. № 97. P. 1063–1077.
- Retallack G.J.* Lateritization and bauxitization events // *Economic Geology*. 2010. № 105. P. 655–667.
- Schellmann W.* Eine neue Laterit definition, *Geologisches Jahrbuch – Reihe D*. 1982. № 58. P. 31–47.
- Tardy Y., Valetton I., Melfi A.* Climats et paleoclimats tropicaux piriatlantiques. Rôle des facteurs climatiques et thermodynamiques: température et activité de l'eau, sur la répartition et la composition minéralogique des bauxites et des cuirasses ferrugineuses, au Brésil et en Afrique, *Comptes Rendus, Académie des Sciences*. 1988. № 306(11). P. 289–295.
- Taylor S.R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1964. № 28. P. 1273–1285.
- Temdjim R., Njilah I.K., Kamgang P. et al.* New data on the felsic lavas from Ngaoundéré (Adamawa, Cameroon Line): K–Ar chronology and petrology // *Afr. J. Sci. Technol. French*. 2004. № 5. P. 113–123.
- Trolard F., Tard Y.* A model of Fe₃b-goethite, Al₃b-hematite equilibria in laterites // *Clay Minerals*. 1989. № 24. P. 1–21.
- Trolard F., Tardy Y.* The stabilities of gibbsite, boehmite, aluminous goethite and aluminous hematites in bauxite, Ferricrete and laterites as a function of water activity, temperature and particle size // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1987. № 51. P. 945–957.
- Valetton I.* Bauxites. *Developments in Soil Science*, 1. Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1972. 226 p.

Alteration, Chemical Process and Parent Rock of Haléo-Danielle Plateau Bauxite, Adamawa – Cameroon

D. G. Nyamsari^{1, #}, M. G. Yalçin^{1, ##}, I. Wolfson^{2, ###}

¹*Akdeniz University, Department of Geological Engineering, Antalya, 07058 Turkey*

²*Russian Geological Society (ROSGEO), 2d Roshchenskaya str., 10, Moscow, 115191 Russia*

[#]*e-mail: dnyamsari@yahoo.com*

^{##}*e-mail: guruhanyalcin@akdeniz.edu.tr*

^{###}*e-mail: mgeolog1955@mail.ru*

The Haléo-Danielle Plateau is one of the plateaus that forms part of the Minim-Martap Bauxite deposit in the Adamawa Region of Cameroon. It is the largest bauxite plateau deposits within the Minim-Martap Bauxite deposit region, stretching 15 km long. The plateau is covered with thin alluvial layer, belonging to Sub-

Recent to Recent of Quaternary period. This is followed by laterite and bauxite belonging to Tertiary-Quaternary basalt. Gibbsite and boehmite are the aluminum oxide found in the bauxite, while goethite is the main oxyhydroxide iron mineral. Bauxite rock samples from the plateau were collected and investigated for their chemical content using the XRF technique and their precursor rock information. Chemical investigation reveals average concentration of the major ore components as: Al_2O_3 (43.73%), Fe_2O_3 (24.53%), SiO_2 (2.12%), and TiO_2 (3.54%). Abundant trace element included Zr (667.25 ppm), V (446.4 ppm), Ce (107.93 ppm), Sr (98.46 ppm), Nb (92.1 ppm), La (58.05 ppm), Ga (55.3 ppm), Ba (53.53 ppm) and Nd (37.96 ppm); and ΣREE (245.8%). Ruxton Ratio and CIA were used to calculate the weathering due to chemical alteration, and both revealed the plateaus have undergone intense weathering process that led to the formation of the bauxite deposit. The bauxite of the deposit of the plateau can be classified as a ferruginous bauxite deposit with the use of three different classification systems. Precursor rock investigation indicates the bauxite originated from mafic Basaltic andesite igneous rocks with intermediate pH.

Keywords: Chemical Process, Environmental Geochemistry, Source Rock, aluminum oxidation.