

УДК 553.94:550.4

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОРОДАХ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ТАТАРСКОГО СВОДА
И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСХОДНОЙ ПРИРОДЫ МЕТАПЕЛИТОВ***Р.Р. Хасанов, Р.Р. Хусаинов***Аннотация**

Исследован вещественный состав метаморфических пород кристаллического фундамента Татарского свода по материалам бурения сверхглубокой скважины 200009 (Ново-Елховская). Выявлены закономерности распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в метаморфических породах различного генезиса и состава. С учетом распределения РЗЭ в метапелитах (высокоглиноземистых породах) большечеремшанской серии проведена реконструкция условий первичного осадконакопления.

Ключевые слова: метапелиты, кристаллический фундамент, метаморфизм, редкоземельные элементы, индикаторы, докембрий.

Введение

На докембрий приходится большая часть геологического времени развития Земли, поэтому изучение литогенеза ранних этапов геологической истории земного шара имеет большое научное и практическое значение. Вопросами геологического строения докембрия Волго-Уральской области занимались многие исследователи: Т.А. Лапинская, Б.С. Ситдииков, В.П. Флоренский, С.В. Богданова, И.Я. Широкова, А.В. Постникова и др.

В настоящее время территория Татарского свода, расположенная в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (восточная часть Русской плиты), пробурена большим количеством глубоких скважин, вскрывших кристаллическое основание на глубину от нескольких метров до 5–6 км. Кристаллический фундамент Татарского свода [1, 2] архей-протерозойского возраста имеет крайне сложное геологическое строение. Он образован гетерогенными сложнодислоцированными породными комплексами, метаморфизованными в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций регионального метаморфизма с наложенным диафторезом. Их основу составляют серии пород первично-магматогенного и первично-осадочного происхождения (соответственно отраденнская и большечеремшанская серии).

Отраденнская серия залегает в основании разреза раннего докембрия Волго-Уральской области и является древнейшим известным в этом регионе стратиграфическим подразделением. Она сложена комплексом пород базитового состава, которые представляют собой древний фундамент осадочно-вулканогенной большечеремшанской серии.

Большечеремшанская серия является одним из наиболее уверенно выделяющихся и хорошо прослеживающихся структурно-вещественных архейских комплексов Волго-Уральской области. Большечеремшанская серия, по данным [3, 4], представлена в основном высокоглиноземистыми кристаллосланцами и гнейсами биотит-гранат-силлиманит-кордиеритового состава, часто содержащими графит до 5%, причем изотопный состав углерода графита ($\delta C^{13} = 1.66\text{--}2.70\%$) [4], что отвечает значениям δC^{13} углерода биогенных образований. По ряду признаков большинством исследователей высокоглиноземистые образования рассматриваются как метаморфизованные преимущественно пелитовые осадки (метапелиты). В небольшом количестве отмечается железисто-кремнистые породы (эвлизиты и кварциты) и метавулканиды. Характерной особенностью разреза метаосадочных пород данной серии является отсутствие карбонатных пород.

Несмотря на высокую степень петролого-геохимической изученности пород кристаллического фундамента Татарского свода, до настоящего времени в них практически не изучались элементы группы редких земель (РЗЭ), в частности лантаноиды.

Объект и методы исследования

В основу настоящей работы положены результаты минералого-петрографического, геохимического и статистического исследования метаморфических пород Ново-Елховского блока кристаллического фундамента, вскрытых сверхглубокой скважиной № 20009 (Ново-Елховская). Скважина расположена в купольной части Южно-Татарского свода в 20 км к северо-западу от г. Альметьевска. Она пробурена в зоне регионального Алтунино-Шунакского разлома в системе опережающих его нарушений. Ее максимальная глубина составила 6.3 км.

По разрезу скважины на основании ГИС данных и минералого-петрографического изучения пород выделяют пять пачек, которые, свою очередь, объединяют в две вышеупомянутые серии – отрядненскую и большечеремшанскую [1].

Отрядненская серия сложена основными кристаллосланцами и гнейсами с небольшим количеством метагабброидов, и представляет собой преимущественно метаморфизованную вулканогенную толщу. В ее составе преобладают пироксенсодержащие породы, отвечающие по минеральному и химическому составу магматическим образованиям с широким диапазоном основности. В зонах диафтореза они сменяются амфиболитами, биотит-амфиболовыми и биотит-пироксеновыми гнейсами. Породы вскрыты в интервалах 2026–2335 м; 3117–4428 м. Они сложены следующими пороодообразующими минералами: плагиоклазом (№ 30-55), гиперстеном, реже клинопироксеном диопсидового ряда, биотитом, амфиболом, редко гранатом, магнетитом, ильменитом, кварцем и калиевыми полевыми шпатами (КПШ). Акцессорные минералы – апатит и циркон.

Большечеремшанская серия сложена высокоглиноземистыми кристаллосланцами и гнейсами с прослоями гранитоидов с гранатом, иногда с кордиеритом и силлиманитом. Породы этой серии представлены тремя пачками, первая пробурена на глубине 1870–2026 м, следующая – 2325–3117 м, третья вскрыта на глубине 4428 м и прослеживается до 5480 м. Для пород данной серии характерны следующие пороодообразующие минералы: плагиоклаз № 20-30, кварц, биотит, гранат, силлиманит, микроклин, графит, иногда ставролит. Акцессорные

минералы представлены цирконом, апатитом, монацитом, пиритом, магнетитом, рутилом. По минеральным парагенезисам метаморфизм пород большечеремшанской серии достигал амфиболитовой фации умеренных давлений.

Особенности минерального состава исходных пород (метабазитов и метапелитов), характер протекающих процессов оказывают влияние на распределение рассеянных элементов и образование различных типов оруденения. Распределение РЗЭ в породах может указывать на специфику условий образования, что обусловлено следующими причинами. Лантаноиды образуют непрерывный ряд от лантана до лютеция [5–7]. Крайние элементы этого ряда – наиболее легкие (лантан, церий) и наиболее тяжелые (иттербий и лютеций) – заметно отличаются друг от друга по геохимическим свойствам, что создает возможность их разделения (фракционирования) в природе в зависимости от изменения физико-химических условий. Это позволяет использовать специфику распределения РЗЭ для реконструкции физико-химических особенностей процессов формирования горных пород и минералов [6, 7].

Исследование редкоземельных элементов проводилось при помощи ИСР-спектроскопии в лаборатории Научно-исследовательского института ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» (г. Казань) на спектрометре ОРТИМА 2000 DV. Вещественный состав исследуемых образцов изучался стандартными оптико-микроскопическими методами в проходящем и отраженном свете. Статистическая обработка полученных результатов была выполнена в программе «STATISTICA v.6.0».

Результаты и их обсуждение

Элементы группы редких земель распределены неравномерно в исследованных породах, которые существенно различаются по составу и исходной природе.

На рис. 1 приведены графики распределения нормированных по хондриту средних содержаний РЗЭ в породах большечеремшанской и отрадненской серий. Отчетливо видно, что средние содержания РЗЭ в высокоглиноземистых породах большечеремшанской серии несколько выше, чем в преимущественно мафитовых породах отрадненской серии. При этом в породах большечеремшанской серии увеличена прежде всего доля легких и средних лантаноидов. Соотношение легких РЗЭ к тяжелым составляет $LREE_{отр}/HREE_{отр} = 4.4$ для отрадненской серии и $LREE_{б.чер}/HREE_{б.чер} = 7.5$ – для большечеремшанской. Эти отношения свидетельствуют о несколько большей доле легких лантаноидов в составе высокоглиноземистых пород большечеремшанской серии, что, очевидно, объясняется различием в вещественном (минеральном и химическом) составе пород разных стратиграфических серий. В отдельных разновидностях пород элементы группы редких земель демонстрируют значительные вариации концентраций. Диапазон колебаний значений по отдельным элементам достигает 2–3-х порядков.

Селективное распределение лантаноидов в минералах обычно объясняют разницей в их ионных радиусах. Общая тенденция заключается в том, что легкие лантаноиды концентрируются преимущественно в силикатных минералах, тяжелые – в мафических. Эта закономерность наиболее отчетливо проявляется в магматогенных породах и связана с разделением РЗЭ на стадии кристаллизации магматического расплава.



Рис. 1. Среднее содержание РЗЭ, нормированное по хондриту [8]

В метаморфических породах распределение РЗЭ носит значительно более сложный характер, так как оно подвержено множеству факторов, связанных с процессами образования и преобразования исходных пород и, как следствие, многократным фракционированием РЗЭ. Приуроченность РЗЭ к определенным минеральным фазам может быть прослежена через их связь с содержанием оксидов породообразующих элементов.

Анализ корреляционной матрицы основных оксидов в породах отраденской серии (табл. 1) показывает их четкую группировку, соответствующую минеральному составу пород. Корреляционная связь, наблюдаемая между Al_2O_3 , Na_2O , CaO , отражает состав плагиоклаза. Тесные связи оксидов, таких как CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , MnO , обусловлены их вхождением в состав кальцийсодержащих разновидностей Fe–Mg минералов – гиперстен, диопсид и авгит ($Ca(Mg,Fe,Al)[(Si,Al)_2O_6]$). Корреляционные зависимости между FeO и CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , MnO подчеркивают характерную для эндогенных минералов роль двухвалентного железа. Связь CaO и P_2O_5 свойственна для апатита ($Ca_5[PO_4]_3(F, Cl, OH)$).

В табл. 2 представлена корреляционная матрица содержаний оксидов породообразующих элементов и лантаноидов в породах отраденской серии. Ее анализ показал ряд специфических особенностей распределения РЗЭ в этих породах.

В породах отраденской серии оксиды Al и Na характеризуются либо слабыми, либо отрицательными связями с лантаноидами и иттрием, но при этом наблюдается слабая положительная связь легких лантаноидов с оксидами Si и K. Такая зависимость может быть обусловлена относительно низкими значениями концентраций РЗЭ в плагиоклазах и приуроченностью легких лантаноидов преимущественно к КПШ, образующимся при гранитизации первичных базитов. В связи с этим следует отметить, что в габбро-диабазе сумма РЗЭ минимальна и обычно не превышает 60–100 г/т, а в породах кислого состава концентрация РЗЭ существенно возрастает. Оксиды CaO , Fe_2O_3 , FeO , MnO положительно коррелируют с элементами Sm, Gd, Lu, Y. Высокую корреляционную связь с магнием демонстрируют Yb и Lu. Подобная связь может указывать на избирательную концентрацию преимущественно тяжелых РЗЭ в Ca–Fe–Mn-

Табл. 1

Корреляционная матрица ($N = 49$) для породообразующих оксидов отрадненской серии

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1.00	-0.68	-0.55	-0.36	-0.61	-0.46	-0.17	-0.53	-0.08	-0.19	-0.27
Al ₂ O ₃	-0.68	1.00	0.16	-0.12	0.06	-0.08	-0.17	0.14	0.35	0.30	0.06
TiO ₂	-0.55	0.16	1.00	0.57	0.74	0.55	0.39	0.55	-0.22	-0.30	0.09
Fe ₂ O ₃	-0.36	-0.12	0.57	1.00	0.62	0.74	0.34	0.24	-0.27	-0.26	0.28
FeO	-0.61	0.06	0.74	0.62	1.00	0.85	0.49	0.82	-0.31	-0.29	0.31
MnO	-0.46	-0.08	0.55	0.74	0.85	1.00	0.60	0.54	-0.13	-0.41	0.52
CaO	-0.17	-0.17	0.39	0.34	0.49	0.60	1.00	0.44	0.35	-0.80	0.59
MgO	-0.53	0.14	0.55	0.24	0.82	0.54	0.44	1.00	-0.25	-0.22	0.19
Na ₂ O	-0.08	0.35	-0.22	-0.27	-0.31	-0.13	0.35	-0.25	1.00	-0.30	0.30
K ₂ O	-0.19	0.30	-0.30	-0.26	-0.29	-0.41	-0.80	-0.22	-0.30	1.00	-0.30

Табл. 2

Корреляционная матрица ($N = 49$) породообразующих оксидов и лантаноидов для отрадненской серии

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
La	0.02	0.13	0.25	0.03	0.22	0.07	0.03	0.10	-0.11	-0.10	0.02
Ce	0.23	-0.17	-0.07	-0.11	0.02	-0.14	-0.23	-0.08	-0.26	0.14	-0.13
Pr	0.24	-0.22	-0.06	-0.05	0.05	-0.08	-0.16	-0.07	-0.25	0.08	-0.07
Nd	0.16	-0.23	0.02	0.04	0.16	0.02	-0.10	0.01	-0.28	0.04	-0.00
Sm	0.09	-0.28	0.06	0.17	0.26	0.17	0.04	0.08	-0.27	-0.03	0.14
Eu	0.20	-0.15	-0.20	-0.18	-0.08	-0.20	-0.16	-0.03	-0.09	0.18	0.03
Gd	0.13	-0.27	0.01	0.02	0.17	0.11	0.03	-0.01	-0.17	-0.04	0.15
Tb	0.08	-0.31	0.07	0.15	0.29	0.26	0.18	0.09	-0.17	-0.14	0.20
Dy	0.08	-0.34	0.11	0.19	0.31	0.30	0.19	0.08	-0.19	-0.17	0.24
Ho	0.02	-0.25	0.13	0.24	0.30	0.29	0.12	0.03	-0.20	-0.11	0.20
Er	0.13	-0.38	0.03	0.19	0.28	0.34	0.22	0.04	-0.14	-0.22	0.22
Tm	0.13	-0.32	0.05	0.17	0.22	0.29	0.17	-0.04	-0.07	-0.22	0.07
Yb	-0.31	-0.09	0.36	0.63	0.71	0.82	0.54	0.43	-0.15	-0.42	0.58
Lu	-0.38	0.11	0.46	0.44	0.58	0.42	0.04	0.41	-0.33	-0.08	-0.02
Y	0.10	-0.38	0.02	0.22	0.35	0.41	0.30	0.11	-0.10	-0.26	0.29

содержащих минералах. К числу таких минералов относятся ортопироксены, а также биотиты, образованные в процессе наложенного регрессивного метаморфизма амфиболитовой фации. Амфиболы и биотиты являются в основном вторичными минералами, развивающимися по пироксенам. Они наследуют исходные концентрации редких земель, среди которых преобладают тяжелые элементы. С оксидом фосфора (P₂O₅), представляющим в первую очередь апатит, ассоциирует группа MREE и Yb, который характеризуется значением коэффициента корреляции, равным 0.58.

Главная особенность мафитов заключается в относительно равномерном распределении РЗЭ в минералах. По-видимому, это связано с первично магматогенным происхождением большинства из них. Перераспределение РЗЭ при наложенных процессах носило незначительный характер и связано главным образом с процессами калиевого метасоматоза при гранитизации исходных пород основного состава.

В связи с изложенными выше закономерностями, выявленными в мафических породах отрадненской серии, представляется интересным анализ корреляционной

Табл. 3

Корреляционная матрица ($N = 99$) для породообразующих оксидов большечеремшанской серии

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1.00	-0.78	-0.65	-0.41	-0.70	-0.49	0.18	-0.62	0.20	-0.34	0.06
Al ₂ O ₃	-0.78	1.00	0.65	0.15	0.42	0.20	-0.30	0.25	-0.06	0.45	-0.05
TiO ₂	-0.65	0.65	1.00	0.39	0.71	0.50	-0.13	0.51	-0.13	0.10	0.03
Fe ₂ O ₃	-0.41	0.15	0.39	1.00	0.75	0.81	0.11	0.48	-0.04	-0.11	0.09
FeO	-0.70	0.42	0.71	0.75	1.00	0.81	-0.05	0.66	-0.17	-0.02	-0.01
MnO	-0.49	0.20	0.50	0.81	0.81	1.00	0.10	0.57	-0.10	-0.13	0.08
CaO	0.18	-0.30	-0.13	0.11	-0.05	0.10	1.00	-0.09	0.77	-0.13	0.53
MgO	-0.62	0.25	0.51	0.48	0.66	0.57	-0.09	1.00	-0.32	-0.13	-0.14
Na ₂ O	0.20	-0.06	-0.13	-0.04	-0.17	-0.10	0.77	-0.32	1.00	0.20	0.67
K ₂ O	-0.34	0.45	0.10	-0.11	-0.02	-0.13	-0.13	-0.13	0.20	1.00	0.28

матрицы оксидов породообразующих минералов в высокоглиноземистых породах большечеремшанской серии. Она имеет свои особенности, так, например, можно выделить совокупность корреляционных связей для определяющих породообразующих минералов (табл. 3).

Корреляционные связи Al₂O₃, Na₂O, CaO обусловлены преимущественным входением этих компонентов в состав плагиоклазов. Наличие микроклина (K[AlSi₃O₈]) в породах изучаемой серии определяет высокий коэффициент корреляции Al₂O₃ и K₂O. В породах большечеремшанской серии связь CaO с TiO₂, Fe₂O₃, FeO, MgO, MnO близка к нулю, что существенно отличает их от пород отраденской серии. Основными фемическими минералами в высокоглиноземистых породах являются гранат и биотит, наличие которых выражается в повышенных корреляционных связях между TiO₂, Fe₂O₃, FeO, MgO и MnO. Повышение значения корреляционных связей между Fe₂O₃ и FeO свидетельствует о возрастании роли трехвалентного железа, что косвенно может указывать на процессы окисления в экзогенных условиях. Для апатита характерна положительная связь между CaO и P₂O₅.

В отличие от пород отраденской серии, в высокоглиноземистых породах большечеремшанской серии РЗЭ показывают более отчетливые зависимости от содержания основных оксидов и более четкую приуроченность к определенным минералам (табл. 4). Для легких и средних лантаноидов отмечаются положительные значения коэффициента корреляции с CaO, Al₂O₃, Na₂O и K₂O, входящими в состав преимущественно полевых шпатов. При этом оксиды калия (K₂O) и алюминия (Al₂O₃) положительно коррелируют также с группой тяжелых лантаноидов. Такого рода связь обусловлена, по-видимому, с одной стороны, тем, что легкие лантаноиды концентрируются в плагиоклазах и КПШ, а с другой – входением калия и алюминия в состав биотита. Для элементов Dy–Lu, Y характерны положительные связи с TiO₂, Fe₂O₃, FeO, MgO, Mn. Таким образом, средние и тяжелые лантаноиды накапливаются в гранатах и биотитах. Корреляция P₂O₅ с группой лантаноидов характеризуется высокими и положительными связями, в минералогическом плане это обусловлено наличием таких минералов, как апатит и монацит, которые играют большую роль в накоплении РЗЭ.

Табл. 4

Корреляционная матрица ($N = 99$) породообразующих оксидов и лантаноидов для большечеремшанской серии

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
La	-0.00	0.13	0.02	-0.18	-0.14	-0.12	0.26	-0.19	0.48	0.35	0.53
Ce	-0.03	0.05	-0.07	-0.20	-0.18	-0.13	0.11	-0.05	0.24	0.28	0.39
Pr	-0.07	0.10	-0.01	-0.16	-0.13	-0.06	0.09	-0.01	0.23	0.29	0.40
Nd	-0.07	0.09	0.00	-0.15	-0.12	-0.05	0.15	-0.02	0.27	0.29	0.44
Sm	-0.09	0.10	0.03	-0.11	-0.09	-0.02	0.16	-0.02	0.26	0.31	0.47
Eu	-0.24	0.26	0.02	-0.07	0.02	-0.02	0.05	0.16	0.20	0.35	0.27
Gd	-0.13	0.13	0.05	-0.16	-0.08	-0.01	0.11	0.03	0.20	0.31	0.40
Tb	-0.18	0.16	0.08	-0.01	0.02	0.14	0.09	0.08	0.15	0.30	0.40
Dy	-0.22	0.18	0.14	0.09	0.13	0.26	0.08	0.12	0.13	0.32	0.36
Ho	-0.22	0.16	0.12	0.18	0.17	0.33	0.01	0.18	0.03	0.23	0.26
Er	-0.24	0.14	0.13	0.14	0.17	0.32	-0.00	0.20	0.00	0.23	0.24
Tm	-0.26	0.14	0.19	0.35	0.34	0.48	-0.08	0.24	-0.08	0.19	0.14
Yb	-0.21	0.19	0.31	0.57	0.49	0.69	0.05	0.21	0.07	0.04	0.20
Lu	-0.22	0.16	0.28	0.55	0.46	0.61	-0.02	0.24	-0.03	0.03	0.11
Y	-0.24	0.16	0.18	0.30	0.27	0.47	0.00	0.22	0.02	0.18	0.29

Итак, в изучаемых породах наблюдается четкое различие в концентрациях и распределениях РЗЭ. Это, в свою очередь, позволяет выделить породы первично осадочного происхождения и предполагает возможность использования геохимических индикаторов для восстановления обстановок осадконакопления в докембрии для пород большечеремшанской серии. Использование данных индикаторов обусловлено ограниченностью литологических методов из-за глубоких метаморфических преобразований исходных пород. В таких случаях возрастает роль геохимических методов, позволяющих проводить генетические реконструкции.

Применение редкоземельных элементов для восстановления первоначальной природы метаосадочных пород обусловлено их инертным поведением [9]. На них слабо влияют постседиментационные трансформации, а также процессы низкотемпературного и высокотемпературного метаморфизма [8], поэтому их соотношения в осадочных породах отражают состав разрушающихся пород на площади палеоводосборов [7, 8]. Для определения палеофациальных условий применялись следующие индикаторы и геохимические коэффициенты [10–14].

1. La/Sm, Ce/Sm, Yb/Sm, Y/Sm – индикаторы удаленности от береговой линии обстановок седиментации [13, 14].

2. Индикатор климата $\Sigma \text{Ce} / \Sigma \text{Y}$ [7, 13]; отражает интенсивность выветривания. Его значения следующим образом характеризуют тип климата: < 2.5 – аридный; 2.5–4.0 – семигумидный – семиаридный; > 4 – гумидный.

3. Соотношение Eu / Eu^* , где $\text{Eu} / \text{Eu}^* = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N) / 2$, является показателем состава размывающихся на палеоводосборах комплексов пород [10–13]. В случае, когда данный параметр находится в пределах 0.85–0.95, можно сделать вывод о преобладании в областях размыва архейских кристаллических пород. Среднее значение для осадочных фанерозойских пород – порядка 0.61–0.72. Наличие положительных Eu-аномалий > 1.0–1.1 связывают с воздействием на них глубинных гидротермальных растворов (флюидов) [9].

Табл. 5

Индикаторы соотношений в высокоглиноземистых породах большечеремшанской серии

Индикатор		Значения	Условия
La/Sm	Индикаторы глубокководности и удаленности от береговой линии	37.85	Прибрежные условия (прибрежные фации)
Ce/Sm		47.14	
Yb/Sm		2.49	
Y/Sm		12.51	
$\Sigma Ce/\Sigma Y$	Индикатор климата	5.8	Гумидный климат
Eu/Eu*	Показатель состава размы- вающихся на палеоводосбо- рах комплексов пород	1.09	Размыв архейских кристаллических пород преимущественно основного состава (отраденская серия)
Eu/Sm	Индикатор степени прони- цаемости различных блоков континентальной коры	0.36	Высокая проницаемость

4. Соотношение Eu/Sm; характеризует степень проницаемости различных блоков континентальной коры [9]. Eu/Sm > 0.30 – проницаемость высокая; Eu/Sm – 0.25 – средняя, Eu/Sm < 0.20 – низкая.

Анализ содержаний РЗЭ и их индикаторных соотношений в высокоглиноземистых (табл. 5) породах позволил выявить ряд закономерностей, обусловленных первично осадочными факторами их формирования.

Элементы группы редких земель в высокоглиноземистых породах распределены неравномерно, разброс значений по отдельным элементам достигает 2–3-х порядков, например La (1.9–103 г/т); Ce (1.4–340 г/т). Среднее суммарное значение РЗЭ в породах большечеремшанской равно 148.9 г/т.

Значения отношений La/Sm, Ce/Sm, Yb/Sm, Y/Sm являются индикаторами фациальных обстановок седиментации. В прибрежных отложениях возрастают значения La/Sm, Ce/Sm, убывают Yb/Sm, Y/Sm. Для более удаленных от берега глубоководных осадков наблюдается обратная тенденция. Значения индикаторов La/Sm = 37.85, Ce/Sm = 47.14, Yb/Sm = 2.49, Y/Sm = 12.51 в породах большечеремшанской серии соответствуют значениям, характерным для прибрежных фаций. Можно предположить, что первичные осадки формировались в прибрежных мелководно-морских условиях и имели преимущественно песчано-алевритовый состав.

Индикатор климата $\Sigma Ce/\Sigma Y$ равен 5.8. Такое значение характерно для климатических условий, при которых количество атмосферных осадков больше, чем может испариться и просочиться в грунты. Это формирует обильный поверхностный сток ручьев и рек. Интенсивное разрушение пород в областях денудации и вынос минералов с повышенным содержанием элементов цериевой группы в область седиментогенеза приводят к увеличению значения данного показателя.

Значение европиевой аномалии составляет 1.09, что указывает на роль глущинных флюидов. Среднее значение Eu/Sm, характеризующее степень проницаемости различных блоков континентальной коры для восходящих флюидных струй, равно 0.36. Этот показатель свидетельствует о высокой проницаемости рассматриваемых пород, что, видимо, обусловлено их первично обломочным происхождением. Повышенная проницаемость осадков способствует, в свою очередь, более активной циркуляции растворов и повышению эндогенной гидротермальной европиевой аномалии.

Выводы

На основании вышеизложенного можно констатировать следующее. Распределение средних содержаний РЗЭ в породах из различных серий характеризуется своей спецификой. В отрадненской серии концентрация легких лантаноидов в 2–3 раза меньше, чем в породах большечеремшанской серии. Концентрациями группы тяжелых лантаноидов для отрадненской серии в основном являются ортопироксены, для группы средних лантаноидов – клинопироксены, а для легких лантаноидов – полевые шпаты и апатит. Концентрации РЗЭ в биотите и амфиболе носят унаследованный характер.

Для пород метаосадочного происхождения (большечеремшанская серия) характерно повышенное содержание легких РЗЭ. Это обусловлено осадочной дифференциацией вещества в результате гипергенной дезинтеграции исходных магматогенных пород основного состава в областях денудации, выноса и преимущественного накопления обломочного материала силикатного состава в различных осадках. Осадки формировались в прибрежных условиях при влажном климате с высоким уровнем химического выветривания. Основная роль в концентрации легких РЗЭ отводится плагиоклазам и монациту, а средние и тяжелые лантаноиды концентрируются в гранатах, биотитах, апатитах и КПШ.

Summary

R.R. Khasanov, R.R. Khusainov. Rare Earth Elements in the Crystalline Basement Rocks of the Tatar Arch and a Reconstruction of the Initial Nature of Alumina Metapelites.

This article investigates the material composition of the crystalline basement metamorphic rocks of the Tatar Arch based on the drilling data of the super-deep well 200009 (Novo-Elkhovskaya). Mechanisms of distribution of the rare earth elements (REE) in the metamorphic rocks of different origin and composition are shown. Taking into account the distribution of REE in metapelites (high-alumina rocks), sedimentation conditions for the Bolshecheremshanskaya series are reconstructed.

Key words: metapelites, crystalline basement, metamorphism, rare earth elements, indicators, Precambrian.

Литература

1. Кристаллический фундамент Татарстана и проблемы его нефтегазоносности / Под ред. Р.Х. Муслимова, Т.А. Лапинской. – Казань: Дента, 1996. – 487 с.
2. Хасанов Р.Р. Рудные минералы кристаллического фундамента Татарского свода, их типоморфизм и генетическое значение: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Казань, 1991. – 24 с.
3. Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии. – М.: Наука, 1986. – 244 с.
4. Лапинская Т.А., Попова Л.П., Постникова А.В., Яковлев Д.О. Волгоуральская нефтегазоносная провинция // Доплатформенные комплексы нефтегазоносных территорий СССР. Ч. 1. – М.: Недра, 1992. – С. 11–145.
5. Хэскин Л.А., Фрей Ф.А., Шмитт Р.А., Смит Р.Х. Распределение редких земель в литосфере и космосе. – М.: Мир, 1968. – 188 с.
6. Минеев Д.А. Лантаноиды в минералах. – М.: Недра, 1969. – 184 с.
7. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 267 с.

8. *Boynnton W.V.* Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite // Rare earth element geochemistry studies / Ed. by P. Henderson. – Amsterdam: Elsevier, 1984. – P. 63–114.
9. *Маслов А.В., Федоров Ю.Н., Ронкин Ю.Л., Алексеев В.П., Лепихина О.П., Лепихина Г.А.* Систематика редкоземельных элементов и элементов платиновой группы в тонкозернистых терригенных породах средней и верхней юры Шаимского нефтегазодобывающего района (Западная Сибирь) // Литосфера. – 2010. – № 2. – С. 3–24.
10. *Зеленская А.Н., Шатров В.А., Сиротин В.И.* Палеофациальные условия образования сланцев курской серии КМА (по результатам изучения распределения REE) // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. – 1999. – № 7. – С. 39–44
11. *Сиротин В.И., Шатров В.А., Войцеховский Г.В.* Редкие земли как индикаторы обстановок осадкообразования в раннем протерозое (на примере курской серии КМА) // Генетический формационный анализ осадочных комплексов фанерозоя и докембрия: Материалы 3-го Всерос. литолог. совещ. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. – С. 254–256.
12. *Шатров В.А., Сиротин В.И., Войцеховский Г.В.* Редкоземельные и малые элементы как индикаторы условий образования железистых кварцитов (на примере Лебединского месторождения КМА) коры // Докл. РАН. – 2002. – Т. 386, № 5. – С. 668–671.
13. *Шатров В.А., Войцеховский Г.В.* Применение лантаноидов для реконструкции обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примере разреза чехла и фундамента восточно-европейской платформы) // Геохимия. – 2009. – № 8. – С. 805–824.
14. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.

Поступила в редакцию
21.11.11

Хасанов Ринат Радикович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой региональной геологии и полезных ископаемых Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Rinat.Khassanov@ksu.ru

Хусаинов Рафаэль Рязович – ассистент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Rafael.Khousainov@gmail.com