

*А. С. Альхов, Е. Г. Панова*

## **ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕМЕНТА ПЕСЧАНИКОВ ПРИОЗЕРСКОЙ СВИТЫ, ВМЕЩАЮЩЕЙ УРАНОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ КАРКУ (С. ПРИЛАДОЖЬЕ)**

На северо-восточном берегу Ладожского озера находится хорошо известное урановое месторождение Карку, которое располагается в зоне структурно-стратиграфического несогласия и является аналогом месторождений района Атабаска (Канада) и провинции «Северные территории» (Австралия).

Месторождения этого типа в России в последние годы изучались сотрудниками ряда геологических организаций: РГЭЦ-филиал ФГУГП «Урангео» (Кушнеренко Г. В., Долгушина И. С. и др.) [1], разными научными коллективами во ВСЕГЕИ под руководством Михайлова В. А. [2] и Афанасьева Г. В., в СПбГУ (Полеховский Ю. С. и др.), а также ВИМСа (Пакульнис Г. В. [3], Шумилов М. В. и Ишевская Э. Г.) Исследования этих авторов и их предшественников позволили серьезно продвинуться в понимании моделей образования месторождений «типа несогласия» и выработке основных поисковых критериев для месторождений этого типа.

Несмотря на наличие большого количества перспективных площадей, на данный момент урановых месторождений этого типа найдено на нашей территории очень мало. Выявленные рудные залежи в районе месторождения Карку локально располагаются на небольшой прибрежной территории, что создает экологические риски при его освоении. Актуальным является выявление урановых месторождений на территории южной части Балтийского щита и других регионов, в которых обнаружены зоны структурно-стратиграфического несогласия в гранито-гнейсовом фундаменте.

Как известно, урановое оруденение месторождения Карку представлено в основном настураном, реже коффинитом и обычно размещается в подошве пласта песчаников приозерской свиты на контакте с подстилающими породами гранито-гнейсового фундамента. Рудовмещающей тощей являются олиго- и мезомиктовые песчаники, с прослоями конгломератов и гравелитов.

В произведенных нами исследованиях проводилось выделение и изучение цемента песчаников, вмещающих урановое оруденение отдельно от обломочного матрикса. Данный подход позволяет разделить геохимические сигналы разных по составу и генезису компонентов породы, исключив из рассмотрения сильный сигнал обломочной составляющей, и получить более корректную информацию о геохимическом составе сопутствующих оруденению метасоматитов для выявления четких индикаторов генезиса и разработки критериев поиска и оценки рудных тел. Именно цемент песчаников наиболее чутко реагирует на физико-химические изменения в минералообразующей среде, фиксируя смену окислительно-восстановительных условий на геохимическом барьере при отложении руд. Оценка изменения химического состава в цементе по простиранию рудных тел позволила охарактеризовать масштабность барьерных эффектов, приводящих к локализации руд.

Выделение цемента было произведено из основных разновидностей песчаников приозерской свиты, включая рудные и околорудные зоны, путем «деликатного дробле-

ния», вибросепарации и отмучивания. Полученное вещество анализировалось методами рентгено-структурного анализа, ISP-МС, сканирующей электронной микроскопии и др.

Состав цемента песчаников приозерской свиты чаще всего глинистый, реже железистый, карбонатный и кремнистый. Глинистый цемент представлен преимущественно цементом заполнения.

Согласно результатам петрографического изучения шлифов, соотношение обломочной части и цемента в наименее измененных разновидностях наблюдается выдержанное соотношение обломочной части (80–90%) и цемента (10–20%). В рудных и околорудных пробах изменяется конфигурация порового пространства, заметно растет доля цемента до 30–40%, а также меняется его тип — появляется регенерационный кремнистый цемент обрастания, крустификационный и коррозионный тип цемента с образованием неправильных форм зерен.

На снимках песчаников приозерской свиты, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 1), наглядно продемонстрированы изменения, описанные выше, а также заметно, что цемент измененного околорудного песчаника менее плотный и более пористый, что делает его более проницаемым для рудообразующих растворов.

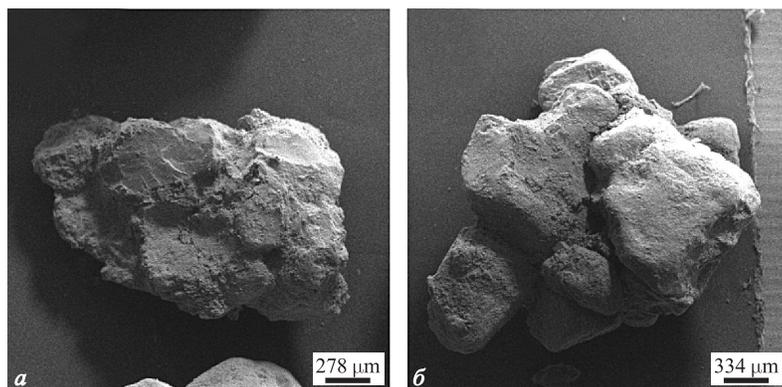


Рис. 1. Микрофотографии различных разновидностей песчаников:  
*a* — неизменный; *б* — сильно измененный.

На основании выполненного рентгено-структурного анализа в ориентированных и разориентированных образцах основных разновидностей цемента песчаников их минеральный состав варьируется в зависимости от степени изменения пород. Выделяются три основные минеральные ассоциации: в слабоизмененных разновидностях цемент представлен в основном диккитом, каолинитом и хлоритом, при приближении к руде характерно увеличение доли хлорита, иллита и кальцита, а в наиболее измененных разновидностях пород цемент — глинисто-карбонатный.

Выделенный цемент из различных типов песчаников был проанализирован методами ИСП МС и атомной абсорбции в лаборатории ВСЕГЕИ.

Высокие уровни накопления Ti, Zr, Sn, Ta в глинистом цементе характеризуют источник сноса, которым в данном случае является комплекс гранитогнейсовых пород архейско-протерозойского фундамента и граниты Салминского массива, имеющие редкометалльную специализацию.

На начальных стадиях гидротермально-метасоматических изменений происходит

перераспределение ряда химических элементов; наблюдается накопление Mo, Pb, Th, U, Ba, V. Цемент наиболее измененных разновидностей околорудных песчаников приозерской свиты по сравнению с предыдущей группой пород значительно обогащен U, As, Cd, Pb, Cu, Zn, Co, а также Pd и Pt. Накопление этой ураново-редкометалльно-полиметаллической ассоциации сопровождается двухкратным сокращением содержаний Mo и Ba (рис. 2, табл. 1).

Таблица 1. Среднее содержание химических элементов в цементе песчаников приозерской свиты района месторождения Карку, г/т.

Элементы	Глины Русской плиты**	Породы					
		1		2		3	
		$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
V	95	52,07	31,09	66,9	34,63	53,54	12,13
Cr	80	29,37	12,98	22,74	7,65	34,53	40,17
Co	16	8,17	3,09	2,92	1,45	5,24	4,73
Ni	44	20,42	27,64	5,86	3,9	100,49	298,08
Cu	30	24,89	36,02	14,35	9,01	37,48	42,53
Zn	74	78,96	43,68	48,89	21,38	93,25	31,96
Ga	23	31,76	12,96	21,87	6,85	23,27	4,47
Ge*	1,7	1,28	0,41	1,37	0,77	1,26	0,38
As*	12	2,02	2,25	0,92	0,74	4,04	2,84
Rb	126	313,31	151,32	89,82	32,76	62,59	18,68
Sr	236	88,15	86,88	43,87	16,10	38,54	8,42
Y	28	29,42	19,68	24,84	11,68	35,39	23,48
Zr	224	242,13	95,46	261,34	140,43	303,92	79,46
Mo	1,4	0,58	0,46	2,33	4,39	1,07	0,29
Ag*	0,072	1,15	0,56	1,30	0,85	1,74	0,80
Cd	0,09	0,16	0,07	0,13	0,04	0,47	0,73
In	0,22	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02
Sn	4,9	7,57	7,22	6,43	9,74	8,08	6,42
Sb	1,1	0,41	0,30	0,40	0,28	0,36	0,14
Cs	5,6	16,26	8,36	2,67	2,09	2,89	1,57
Ba	415	372,84	141,28	424,64	213,86	254,64	94,64
Hf	6,2	6,96	2,78	7,81	3,78	9,82	2,57
Ta*	1,5	3,37	1,71	3,66	4,17	3,12	2,10
W	2,1	2,17	1,43	7,33	11,26	52,87	104,07
Tl	0,4	9,12	6,97	1,84	1,60	0,98	0,32
Pb	18	5,52	3,17	13,08	18,53	47,98	48,77
Pd	n*0,01	2,34	1,51	1,85	0,98	2,56	2,04
Pt	n*0,01	0,19	0,11	0,14	0,08	0,23	0,17
Th	11,5	15,96	9,57	37,59	82,84	36,79	16,26
U	3,8	4,71	5,76	9,40	8,16	74,01	62,04
Th/U	3,0	3,4	1,7	4,0	10,2	0,5	0,3
Кол-во проб:		19		23		8	

Примечание: 1–3 — цемент песчаников: 1 — неизмененных, 2 — слабо- и 3 — сильноизмененных.

\* — по Е. В. Склярову [5]; \*\* — по А. Б. Ронову [4].

Анализ вариаций химического состава цемента был выполнен с использованием метода главных компонент факторного анализа, что позволило выделить три основных фактора (рис. 3).

Первый фактор ( $F_1$ ) характеризует состав пород источника сноса, что подтверждается высокими содержаниями аксессуарных минералов в песчаниках приозерской свиты (рутил, циркон, ильменит).

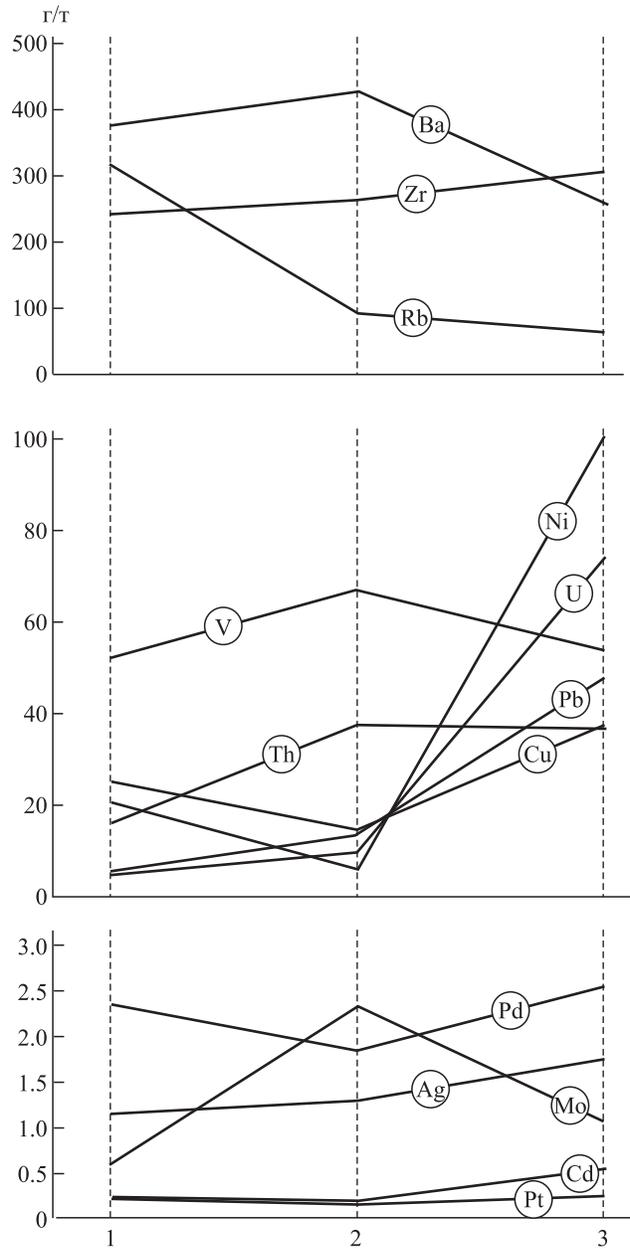


Рис. 2. График распределения среднего содержания химических элементов в цементе основных разновидностей песчаников приозерской свиты района месторождения Карку. 1-3 — цемент песчаников: 1 — неизмененных, 2 — слабо- и 3 — сильно-измененных.

Второй фактор ( $F_2$ ) отвечает за предрудную гидротермально-метасоматическую переработку цемента песчаников с привнесом ряда химических элементов (Rb, K, Mg),

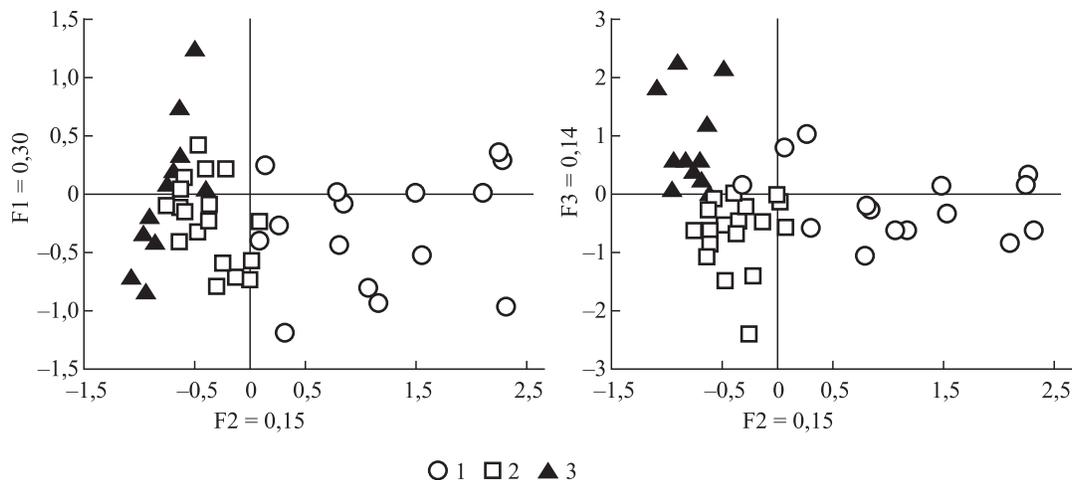


Рис. 3. Диаграммы результатов факторного анализа химического состава цемента песчаников приозерской свиты.

1–3 — цемент песчаников: 1 — неизмененных, 2 — слабо- и 3 — сильноизмененных.

$F_{1\ 0,30} = \text{Ta}_{0,93} \text{Ti}_{0,92} \text{Sn}_{0,88} \text{Th}_{0,87} \text{Zr}_{0,86} \text{Ag}_{0,85} \text{Pt}_{0,67} \text{Pd}_{0,63}$ ,

$F_{2\ 0,15} = \text{Rb}_{0,83} \text{K}_{0,82} \text{Mg}_{0,67} \text{Co}_{0,64} \text{Mn}_{0,62} \text{Na}_{0,57}$ ,

$F_{3\ 0,14} = \text{U}_{0,67} \text{Zn}_{0,62} \text{Pb}_{0,61} \text{Cu}_{0,61} \text{As}_{0,46}$ .

отражая влияние предрудного щелочного метасоматоза. По значениям второго фактора выборка распадается на две группы: 1) цемент относительно неизмененных песчаников и 2) цемент пород, в разной степени подвергшихся гидротермальным изменениям.

Третий фактор ( $F_3$ ) отвечает за ураново-рудную стадию гидротермального процесса. Помимо урана в ассоциацию этого фактора входят Pb, Zn, Cu, As, которые накап-

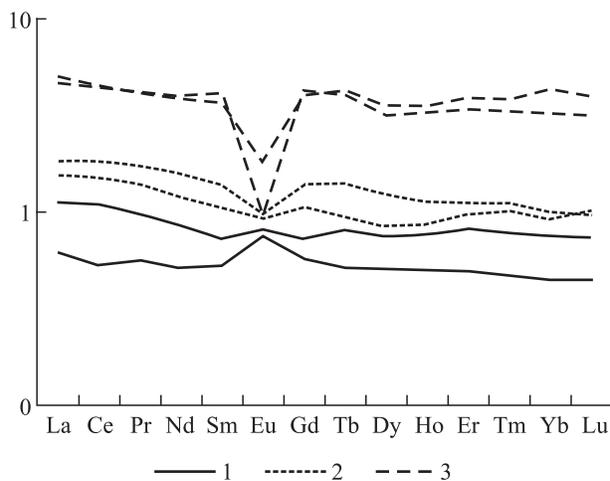


Рис. 4. Спектры распределения РЗЭ в цементе основных разновидностей песчаников приозерской свиты.

1–3 — цемент песчаников: 1 — неизмененных, 2 — слабо- и 3 — сильноизмененных. Две линии — пределы значений для каждой группы.

ливаются в сульфидах, ассоциирующих с минералами урана. На фоне группы цемента из безрудных и околорудных песчаников контрастно выделяются пробы с положительными значениями этого фактора, содержащие U от 15 до 100 г/т и более, которые мы относим к сильноизмененным породам.

При изучении распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в цементе из основных разновидностей песчаников приозерской свиты в качестве эталона для нормировки была выбрана генеральная проба глин Русской платформы, известная как стандарт RPSC [4] (табл. 2). Выявленные различия спектров распределения РЗЭ, представленные на рис. 4, наглядно иллюстрируют разную степень гидротермальной переработки цемента песчаников приозерской свиты.

Таблица 2. Среднее содержание редкоземельных химических элементов в цементе песчаников приозерской свиты района месторождения Карку, г/т.

Элементы	Породы						
	Глины Русской плиты	1		2		3	
		$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
La	37,5	38,17	13,29	63,16	14,33	120,08	51,21
Ce	74,80	69,17	25,82	120,98	24,15	211,32	104,56
Pr	8,60	7,43	2,38	13,23	2,73	24,29	11,13
Nd	32,30	25,40	8,25	44,20	9,43	82,28	43,88
Sm	6,20	4,79	1,78	7,23	1,45	13,85	10,03
Eu	1,30	1,22	0,38	1,18	0,19	1,14	0,13
Gd	5,21	4,56	2,09	6,12	1,38	11,80	8,80
Tb	0,79	0,70	0,34	0,89	0,31	1,66	1,36
Dy	4,88	4,02	1,87	4,66	1,82	8,09	6,60
Ho	0,96	0,80	0,38	0,91	0,35	1,65	1,33
Er	2,78	2,38	1,08	2,60	1,01	4,96	3,91
Tm	0,41	0,34	0,17	0,38	0,15	0,73	0,55
Yb	2,73	2,18	1,06	2,48	1,02	4,68	3,58
Lu	0,41	0,33	0,16	0,36	0,15	0,70	0,51
$\Sigma$ REE	178,87	161,47	57,62	268,38	58,03	487,22	244,64
LREE	160,70	146,17	51,36	175,01	116,30	452,96	218,50
HREE	18,17	15,3	7,12	18,40	6,07	34,26	26,62
La/Yb	13,73626	18,36	3,23	27,27	6,57	30,27	11,80
Eu(min)	0,0013	1,26	0,17	0,84	0,06	0,24	0,02
Ce/Yb	27,39927	33,10	7,18	52,85	14,85	51,10	11,74
Кол-во проб:		19		23		8	

Примечание: 1–3 – цемент песчаников: 1 – неизменных, 2 – слабо- и 3 – сильноизмененных.

Величина суммы РЗЭ в цементе наименее измененных пород находится на уровне 161,47 г/т, что соответствует пробе глин Русской платформы, –178,87 г/т. В большинстве проб наблюдается небольшая положительная Eu аномалия ( $Eu/Eu^*$  – до 0,81), величина  $La/Yb_{cp} = 18,36$ . Такие значения обычно указывают на слабощелочные условия среды образования глинистых минералов [6]. В ряде проб наблюдается небольшое обогащение легких лантаноидов цериевой группы.

В цементе околорудных песчаников сумма РЗЭ достигает значений 280–305 г/т, что в 1,5 раза превышает RPSC, появление слабой отрицательной аномалии Eu и резкое обогащение легкими лантаноидами цериевой группы фиксирует смену слабо щелочного режима на слабокислый, что соответствует смене режима щелочности – кислотности при гидротермально-метасоматических процессах.

В пробах цемента наиболее измененных песчаников сумма редких земель колеблется в пределах 700–800 г/т, достигая 901,5 г/т, что в 4,5–5 раз превышает RPSC. Вместе с увеличением уровня накопления РЗЭ увеличивается и значение отрицательной аномалии Eu ( $Eu/Eu^* = 0,31-12$ ), образуя характерный «птицеобразный» мотив распределения спектров РЗЭ; величина  $La/Yb_{cp} = 30,27$ , что более чем в 2 раза превышает RPSC. Подобная картина складывается при влиянии гидротермальных растворов богатых летучими (F и V) и карбонатными комплексами в кислой обстановке богатой кислородом, которые, как известно, и переносят РЗЭ и уран.

Таким образом, на основании минералого-петрографического изучения пород, детального определения минерального состава цемента методом рентгеноструктурного анализа выделены минеральные ассоциации цемента неизменных, слабо- и сильноизмененных песчаников вмещающих урановое оруденение.

Впервые выделен цемент песчаников отдельно от обломочного матрикса и дана его геохимическая характеристика. В цементе обнаружены платиноиды (г/т): Pd — до 9,5; Pt — 0,016–0,5; Ro — до 0,07; Au, Ru, Ir, Os — не обнаружены в пределах чувствительности метода. Ассоциации химических элементов цемента песчаников контрастно отражают степень гидротермально-метасоматических изменений пород, что позволяет использовать эти данные при поисках рудных тел в пределах известных рудных полей.

При переходе от неизменных к гидротермально-измененным породам в цементе песчаников увеличивается сумма РЗЭ, меняется соотношение элементов церовой и итровой групп и  $Eu/Eu^*$  отношение, что отражает смену щелочно-кислотных условий минералообразования и фиксирует наиболее благоприятные условия для формирования барьерного эффекта отложения урановых руд.

Полученные геохимические данные могут быть использованы для разработки локальных критериев поиска рудных тел в пределах урановых рудных полей.

## Литература

1. Долгушина И. С., Кишнеренко В. К. Геохимические критерии прогнозирования месторождений урана типа несогласия (на примере месторождения Карку) // Материалы по геологии месторождений урана и редких металлов. М., 2004. Вып. 146.
2. Былинская Л. В., Толмачева Е. В., Михайлов В. А., Демичева Л. А. Минералогия и условия образования урановых руд месторождения Карку (Приложение) // Материалы по геологии месторождений урана и редких металлов. М., 2004. Вып. 145.
3. Пакульнис Г. В. О крупных гидротермальных месторождениях урана // Отечественная геология. 2005. № 6.
4. Ронов А. Б., Мигдисов А. А. Количественные закономерности строения и состава осадочных толщ Восточно-европейской платформы и Русской плиты и их место в ряду древних платформ мира // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 5.
5. Скларов Е. В. и др. Интерпретация геохимических данных: Учеб. пособие / Под ред. Е. В. Скларова. М., 2001.
6. Балашев Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М., 1976.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2010 г.