

УДК 66.081:669.296:546.226-325

DOI: 10.15372/ChUR2020217

## Исследование разложения эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии в сернокислой среде

Э. П. ЛОКШИН, О. А. ТАРЕЕВА, С. В. ДРОГОБУЖСКАЯ

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты (Россия)*

*E-mail: Lokshin.ep@gmail.com*

(Поступила 01.07.19; после доработки 09.09.19)

### Аннотация

Исследовано разложение эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии в растворе 2 мас. % серной кислоты. Показано, что при температуре 80 °С эвдиалит разлагается с образованием кремнегеля, а при 20 °С – кремнезоля. Эффективность поглощения сорбентом тугоплавких редких элементов при проведении процесса в режиме образования кремнезоля по сравнению с режимом образования кремнегеля возросла для циркония – с 52.5 до 89.4, гафния – с 60.1 до 89.2, ниобия – с 7.4 до 85.1, тантала – с 0 до 67.1, титана – с 27.6 до 80 соответственно, при обеспечении высокого извлечения редкоземельных элементов (РЗЭ) – 82.9 %, в том числе РЗЭ иттриевой и средней групп – до 86–89 %. При этом основные потери ниобия, тантала, титана и РЗЭ связаны с их входением в состав не вскрывающегося в исследованных условиях лопарита и других аксессуарных минералов. Предположено, что значительное увеличение поглощения сорбентом редких элементов IV и V групп при 20 °С (по сравнению с результатами, полученными при 80 °С) обусловлено не только образованием кремнезоля, но и уменьшением гидролиза катионов этих металлов с образованием ими несорбируемых сульфокатионитом форм. Сопоставлены особенности разложения эвдиалитового концентрата растворами азотной и серной кислот низкой концентрации. Обсуждаются причины, обеспечившие образование кремнезоля при низкотемпературном сернокислотном разложении эвдиалита. Отмечено, что исследованный метод может быть положен в основу эффективной технологии переработки эвдиалитового концентрата, так как по сравнению с традиционными кислотными методиками при его использовании в 3–5 раз снижается расход кислоты и, как следствие, количество подлежащих утилизации жидких отходов, уменьшаются эффективная удельная радиоактивность кремнеземного остатка и расход энергоресурсов.

**Ключевые слова:** эвдиалитовый концентрат, кислотная переработка, редкие элементы, извлечение

### ВВЕДЕНИЕ

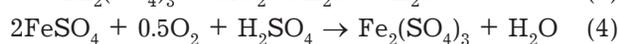
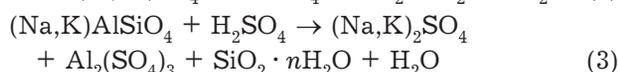
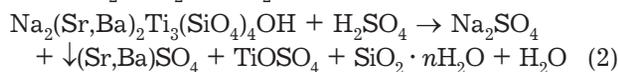
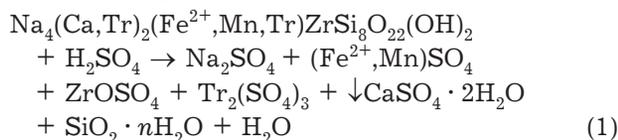
Перспективной сырьевой источник получения циркониевой продукции – эвдиалитовый концентрат, содержащий кроме циркония и гафния редкоземельные элементы (РЗЭ), ниобий и тантал. Сумма РЗЭ эвдиалитового концентрата обогащена иттрием и лантаноидами средней и иттриевой групп.

При разработке гидрохимических технологий переработки эвдиалитового концентрата первостепенная проблема заключается в его

кислотном разложении с получением содержащего редкие элементы раствора и кремнеземного остатка. Наибольший интерес вызывает сернокислотное разложение [1–8], поскольку серная кислота является дешевым, малолетучим соединением, и природоохранное законодательство допускает достаточно высокое содержание сульфат-иона в сточных водах.

Лампрофиллит, нефелин, эгирин, лопарит, полевые шпаты – основные аксессуарные минералы эвдиалитового концентрата. Разложение

эвдиалита, лампрофиллита и нефелина описывается следующими схемами:



где формулы минералов приведены по данным [9].

В рекомендуемых режимах эгирин, лопарит, полевые шпаты с серной кислотой не взаимодействуют и попадают в твердый остаток на основе гидратированного кремнезема. Кроме этого в остатке содержатся сульфаты кальция, стронция и бария, а также образующиеся при взаимодействии сульфатов РЗЭ цериевой группы и сульфата натрия малорастворимые двойные сульфаты  $\text{NaTr}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , с которыми изоморфно сокристаллизуется основная часть тория и часть РЗЭ иттриевой группы. Эффективная удельная радиоактивность ( $A_{\text{эфф}}$ ) кремнеземного остатка может превышать 0.74 кБк/кг. Лишь  $\leq 40\%$   $A_{\text{эфф}}$  определяется торием попадающего в остаток лопарита.

В ранних исследованиях получали кремнезем в виде геля, а извлечение циркония не превышало 78 % [1]. Позднее найдены решения, при которых удавалось получить мало обводненный, достаточно легко фильтрующийся кремнезем [2–8]. Расход  $\text{H}_2\text{SO}_4$  составлял 120–200 % от стехиометрически необходимого, при этом до 84 % циркония переходило в сульфатный раствор, но РЗЭ преимущественно оставались в кремнеземном остатке в виде малорастворимых двойных сульфатов с натрием и сокристаллизованных с ними сульфатов РЗЭ средней и иттриевой групп, а также не разлагавшегося лопарита [6, 7].

Извлечение циркония в раствор увеличилось до 94 % при введении в сернокислый раствор  $\text{NaF}$  в количестве, обеспечивающем соотношение  $\text{F}/\text{Zr} \geq 3$  [8].

Известные методы сернокислотного разложения эвдиалитового концентрата имеют следующие основные недостатки:

- большой расход серной кислоты и, как следствие, образование повышенного количества солесодержащих жидких отходов, методы утилизации которых не разработаны;

- “размазывание” РЗЭ между раствором и кремнеземным остатком, что затрудняет их выделение;

- отсутствие или искажение информации о количестве и составе твердых и жидких отходов, распределении радионуклидов. Например, утверждается, что по разработанной технологии образуется 9.1 кг отходов (в пересчете на твердые продукты) на 1 т эвдиалитового концентрата, хотя из приведенных данных по материальному балансу видно, что их в 67 раз больше [8]; при этом не обоснована декларируемая возможность использования кремнеземного продукта, количество которого составляет почти половину от исходного концентрата; не учитывается его загрязнение торием, сульфатами кальция, стронция;

- использование добавок фторид-иона, обеспечивающих высокое извлечение циркония, заметная часть которых будет попадать в сбросные растворы, что еще более затруднит их утилизацию.

Поэтому актуальны исследования, направленные на снижение расхода серной кислоты и количества требующих утилизации отходов, повышение извлечения редких элементов и комплексности использования сырья.

Цель настоящей работы – изучение закономерностей разделения редких металлов и кремнезема при сернокислотном разложении эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Физико-химические основы метода сорбционной конверсии описаны в [10]. Химический состав используемого в работе эвдиалитового концентрата приведен в [11]. Методика эксперимента и проведения анализов, обработки экспериментальных результатов описаны в [12]. Крупность частиц концентрата не превышала 0.2 мм.

Для исследования эффективности сорбционной конверсии эвдиалитового концентрата с использованием серной кислоты выбраны следующие условия проведения опытов. Расход сорбента КУ-2-8чС (ГОСТ 20298–74) в  $\text{H}^+$ -форме равен 70 % к стехиометрически необходимому для поглощения всех катионов концентрата ( $6 \text{ см}^3$  набухшего сорбента на 1 г концентрата). Соотношение объема (мл) раствора 2 мас. %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (квалификация “х. ч.”, ГОСТ 4204–77) и массы

концентрата ( $\tau$ ) составляло 15. Температура ( $T$ ) процесса в опыте 1 – 80, в опыте 2 – 20 °С. Продолжительность взаимодействия – 4 ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты исследований приведены в табл. 1–3. В опыте 1 продуктами являлись насыщенный сорбент, раствор, кремнегель и остаток невоскрытых минералов, в опыте 2 – насыщенный сорбент, остаток невоскрытых минералов и кремнезоль, переходивший в кремнегель лишь после длительной выдержки. В опы-

те 1 масса высушенных при 80 °С кремнегеля и остатка невоскрытых минералов составляла 50.4 отн. %, в опыте 2 ( $T = 20$  °С) масса остатка невоскрытых минералов – 56.0 отн. %.

В табл. 4 приведены рассчитанные по экспериментальным данным значения коэффициентов распределения компонентов между сорбентом и раствором ( $K_d$ ) с использованием формулы

$$K_d = \frac{m_c \cdot V_p}{m_p \cdot V_c} \quad (5)$$

где  $m_c$  и  $m_p$  – масса компонентов в сорбенте и растворе соответственно;  $V_p$ ,  $V_c$  – объем раствора и сорбента соответственно.

ТАБЛИЦА 1

Содержание поглощенных сорбентом компонентов эвдиалитового концентрата, отн. %

Опыт	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SrO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	47.6	82.6	86.7	72.2	88.7	82.4	72.5	64.8
2	77.3	89.0	97.0	84.5	84.3	87.9	92.7	88.9
Опыт	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
1	0	27.6	52.5	60.1	7.4	0	66.8	87.4
2	0	80.0	89.4	89.2	85.1	67.1	65.2	91.4
Опыт	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	92.0	79.1	79.8	84.2	86.5	88.0	90.1	90.3
2	89.6	77.6	77.0	77.0	83.6	87.3	87.5	85.7
Опыт	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣTr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	90.8	91.0	91.0	91.3	91.1	90.5	91.6	85.7
2	86.1	87.0	85.6	88.8	83.5	88.5	86.0	82.9

ТАБЛИЦА 2

Содержание оксидов металлов в высушенных при 80 °С продуктах, мас. %

Опыт	Продукт	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SrO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	1-1	2.99	0.156	0.095	0.73	0.39	0.23	0.48	1.33
	1-2	7.90	2.56	0.384	3.19	1.50	1.26	4.29	4.54
2	2	2.23	0.145	0.042	0.67	0.54	0.34	0.41	0.67
Опыт	Продукт	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
1	1-1	55.3	1.10	4.48	0.133	0.64	0.046	0.0034	0.0012
	1-2	39.8	5.30	3.96	0.084	0.49	Н.а.*	0.0114	0.003
2	2	40.7	0.63	1.42	0.034	0.16	0.012	0.0060	0.0008
Опыт	Продукт	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	1-1	0.0324	0.0418	0.0816	0.0084	0.0304	0.0076	0.002	0.007
	1-2	0.119	0.212	0.402	0.033	0.112	0.028	0.007	0.023
2	2	0.0769	0.0975	0.200	0.0233	0.0672	0.0146	0.0043	0.0175
Опыт	Продукт	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣTr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	1-1	0.001	0.006	0.001	0.004	0.0005	0.004	0.0004	0.227
	1-2	0.004	0.023	0.004	0.014	0.002	0.013	0.002	0.997
2	2	0.0031	0.0165	0.0037	0.0088	0.0017	0.0079	0.0012	0.544

Примечание. Продукты: 1-1 – кремнегель; 1-2, 2 – остаток невоскрытых минералов.

\* Не анализировалось.

Исходная концентрация  $[H^+]$  равна 0.306 моль/л. В конце процесса концентрация  $[H^+]$  снижалась до ~0.15 моль/л.

По данным рентгенофазового анализа, основная часть твердых остатков – рентгеноаморфное вещество. С помощью кристаллооптического анализа в остатке обнаружены также лопарит, микроклин (возможно, ортоклаз) и эгирин.

При оценке потерь РЗЭ и ниобия следует учитывать, что часть этих элементов входит в состав не разлагающегося в процессе лопарита. Как показали исследования, лопарита в концентрате немного более 1 мас. % [11]. При этом с ним связано около 12 % РЗЭ преимущественно цериевой группы и до 20 % ниобия и тантала.

При кислотном разложении эвдиалитового концентрата обычно получали кремнегель, с которым терялась значительная часть редких элементов. Полагали, что эти потери обусловлены высоким содержанием в кремнегеле концентрированного по редким элементам дисперсионного раствора. Кроме того, образование кремнегеля определяло низкую скорость фильтрации при разделении жидкой и твердой фаз.

Для предотвращения образования кремнегеля предложен ряд подходов. В наиболее изученном методе эвдиалитовый концентрат обрабатывают 30–40 % серной кислотой при температуре 80–120 °С и расходе кислоты 125–200 % от стехиометрически необходимого [8]. Извлечение циркония и РЗЭ в раствор после отделения сернокислого раствора и двухстадийной водной промывки возросло до 84.3 и 56.2 % соответственно. Извлечение ниобия, радиоактивность образовавшихся продуктов и соотношение РЗЭ в полученном концентрате не изучались.

При сорбционной конверсии переходящие в раствор полизарядные металлы, имеющие более высокие по сравнению со щелочными металлами ионные потенциалы, даже при низкой концентрации в растворе эффективно сорбируются сульфокатионитом. Поэтому содержание редких элементов в дисперсионных растворах сорбционной конверсии невелико. Однако при таком методе разложения концентрата потери редких металлов значительны из-за образования гидратных полимеров этих металлов с кремнеземом. Сделано предположение, что если ис-

ТАБЛИЦА 3

Концентрация компонентов в маточных растворах, мг/л

Опыт	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SrO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	2074	45.8	2.9	60.9	18.0	0.024	6.3	36.9
2	1128	42.5	3.7	158	11.5	29.14	27.2	42.4
Опыт	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
1	6460	101	1138	124	3.74	26.8	0.079	4.09
2	12220	41.2	128	5.21	0.75	2.22	0.077	0.22
Опыт	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	0.26	0.057	0.13	0.016	0.074	0.024	0.0065	0.023
2	1.50	2.72	1.88	0.21	0.75	0.20	0.068	0.22
Опыт	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣTr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	0.004	0.028	0.0057	0.018	0.0026	0.0035	0.033	1.39
2	0.050	0.25	0.062	0.15	0.026	0.13	0.020	8.24

Примечание. Опыт 1 – кислотный раствор; опыт 2 – золь.

ТАБЛИЦА 4

Величины коэффициентов распределения компонентов в сорбенте ( $K_d$ )

Опыт	Na	K	Mg	Ca	Sr	Mn	Th	U
1	4.2	39.7	505	82.5	114	100	429	161
2	14.8	46.1	425	35.2	248	98	135	67
Опыт	Al	Fe	ΣTr	Ti	Zr	Hf	Nb	Ta
1	755	116	1404	9.42	7.17	20.1	0.60	0
2	209	138	309	66.6	108	71.5	1064	14.7

ключить образование кремнегеля, извлечение редких элементов в сорбент будет возрастать [13].

Для разложения эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии использовали раствор 2 %  $H_2SO_4$ . Характер взаимодействия сильно зависел от температуры процесса: при 80 °С кроме сорбента и твердого остатка получены раствор и кремнегель, а при 20 °С – кремнезоль. Снижение температуры разложения способствовало замедлению коагуляции кремнезема в растворе. Концентрация  $SiO_2$  в полученных сернокислых растворах составила при 80 °С – 2.2 г/л, а при 20 °С – 12.2 г/л. Сорбент достаточно просто отделялся от продуктов реакции на сетчатом фильтре. Наиболее полно разделение достигалось в случае образования кремнезоля.

Исключение образования кремнегеля, как и ожидалось [13], способствовало поглощению сорбентом полизарядных металлов (см. табл. 1), особенно циркония, гафния, ниобия, тантала. При повышении температуры поглощение сорбентом большинства металлов (за исключением РЗЭ и тория) снижалось.

В концентрате РЗЭ иттриевой группы практически полностью входят в состав эвдиалита [11]. Судя по их суммарному извлечению в сорбент и раствор, оцененному на основе данных табл. 1 и 3, разложение эвдиалита при 80 °С превысило 92 %, а при 20 °С – 89 %. Извлечение в сорбент РЗЭ (в том числе цериевой группы) значительно превосходило их извлечение в сульфатный раствор при обычном выщелачивании сернокислыми растворами [5]. Содержание РЗЭ в маточных растворах низкое и незначительно повышается при снижении температуры процесса (см. табл. 3). Исключение составляет катион натрия, сорбция которого осложняется низким расходом сорбента.

Незначительное уменьшение количества извлеченных РЗЭ при понижении температуры, вероятно, определяется затруднением разложения содержащих эти элементы акцессорных минералов, например лампрофиллита.

Если при 20 °С извлечение элементов IV и V групп (циркония, гафния, ниобия, тантала) коррелировало со степенью разложения эвдиалита, то при 80 °С их поглощение сорбентом было значительно меньше степени разложения. При этом содержание этих металлов в кремнегеле и полученном при 80 °С остатке невоскрытых минералов было значительно выше, чем в таком же остатке, полученном при 20 °С (см. табл. 2). Увеличение потерь определяется усилением образования кремнегелем и остатком нераз-

жившихся минералов гидратных полимеров с кремниевой кислотой, чему благоприятствует усиление при повышении температуры гидролиза их катионов. С гидролизом связано и образование трудно сорбирующихся комплексов в растворе. Это подтверждается значительным возрастанием концентрации этих элементов не только в твердых остатках (см. табл. 2), но и в маточных растворах (см. табл. 3). Существенное изменение характера сорбции элементов IV и V групп иллюстрирует многократное уменьшение при повышении температуры величин их  $K_d$ , в то время как для остальных элементов значения  $K_d$  либо практически не меняются, либо возрастают (см. табл. 4).

При 20 °С достигнуто высокое извлечение в сорбент как РЗЭ, так и других редких элементов: циркония, гафния, ниобия, тантала, титана. Одновременно в кремнеземный остаток не попала основная часть двухвалентных элементов, в том числе щелочноземельных. При традиционных методах сернокислотного разложения эвдиалитового концентрата содержание в кремнеземном остатке сульфатов щелочноземельных металлов превосходит 23 мас. %, что может стать серьезным препятствием для его использования.

Большая часть тория и основная часть урана также поглощаются сорбентом. Это определяет резкое снижение величины  $A_{эфф}$  кремнеземных продуктов, которая без выделения из них лопарита составляет 0.33–0.37 кБк/кг, а после его выделения становится пренебрежимо малой (0.04–0.08 кБк/кг).

Расход  $H_2SO_4$  составил 40 % от стехиометрически необходимого. Таким образом, при сорбционной конверсии эвдиалитового концентрата расход  $H_2SO_4$  и, как следствие, количество подлежащих утилизации жидких отходов по сравнению с традиционными методами снижается в 3–5 раз. Проведение процесса разложения при комнатной температуре определяет значительное снижение расхода энергоресурсов.

В 1 л полученного при 20 °С сорбента содержится, г:  $Na_2O$  25.6,  $K_2O$  3.00,  $MgO$  2.43,  $CaO$  8.53,  $SrO$  4.35,  $MnO$  4.39,  $Al_2O_3$  8.74,  $\Sigma Tr_2O_3$  3.92,  $TiO_2$  4.21,  $ZrO_2$  21.3,  $HfO_2$  0.57,  $Nb_2O_5$  1.32,  $Ta_2O_5$  0.05,  $ThO_2$  0.0167,  $UO_2$  0.021. Найденны методы десорбции, при которых в элюат переходили щелочные, щелочноземельные, редкоземельные элементы, марганец, алюминий, железо и титан, при этом цирконий, гафний, ниобий, тантал оставались в сорбенте. При последующей переработке элюата последовательно выделяются содержащий марганец, алюминий, железо и ти-

тан гидроксильный кек, карбонатный концентрат РЗЭ, карбонат кальция, карбонатный стронциевый концентрат.

Таким образом, метод сорбционной конверсии перспективен для комплексной переработки эвдиалитового концентрата. Методы утилизации кислотного золя, десорбции тяжелых редких элементов (особенно ниобия и тантала) и их выделения из элюатов предстоит разработать.

Следует отметить, что при сорбционной конверсии с использованием раствора  $\text{HNO}_3$  (2 мас. %) как при 20 °С, так и при 80 °С получался только кремнегель. Это, по-видимому, определяется более высокой скоростью разложения эвдиалита азотнокислым раствором, в то время как образующиеся при использовании сернокислого раствора малорастворимые сульфаты кальция и стронция частично блокируют частицы эвдиалита, замедляя его разложение. Замедление кислотного разложения эвдиалита приводит к снижению скорости выделения тепла при этой экзотермической реакции и, как следствие, ослаблению локального перегрева на поверхности раздела взаимодействующих фаз, способствующего полимеризации гидратированного кремнезема и усилению гидролиза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано разложение эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии в растворе 2 мас. % серной кислоты. Установлено, что характер процесса разложения сильно зависит от температуры: при 80 °С образуется кремнегель, а при 20 °С – кремнезоль.

Проведение процесса в режиме, обеспечивающем образование кремнезоля, способствовало возрастанию поглощения сорбентом циркония с 52.5 до 89.4, гафния с 60.1 до 89.2, ниобия с 7.4 до 85.1, тантала с 0 до 67.1, титана с 27.6 до 80 % при обеспечении извлечения РЗЭ – 82.9 %, в том числе РЗЭ иттриевой и средней групп – до 86–89 %. Значительное увеличение поглощения сорбентом редких элементов IV и V групп при 20 °С по сравнению с результатами, полученными при 80 °С, по-видимому, обусловлено образованием при разложении эвдиалита кремнезоля при одновременном уменьшении гидролиза катионов указанных элементов. Снижение гидролиза катионов этих металлов способствует

повышению эффективности их выщелачивания, снижению захвата кремнегелем, исключению перехода в несорбируемые формы. Как следствие, уменьшаются их содержание в остатке невоскрытых минералов и кремнегеле, а также потери с маточным раствором.

При сорбционной конверсии эвдиалитового концентрата по сравнению с традиционными подходами снижается в 3–5 раз расход кислоты и, как следствие, количество подлежащих утилизации жидких отходов, уменьшаются эффективная удельная радиоактивность кремнеземного остатка и расход энергоресурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Мотов Д. Л., Лештаева Т. Г. Изучение процесса сернокислотного разложения эвдиалитового концентрата / Химическая технология редкоземельного сырья. Сб. ст. М.-Л.: Наука, 1966. С. 5–15.
- 2 Яшникова О. М., Шуменко В. Н., Коленкова М. А., Ануфриева Г. И. Изучение процесса извлечения редкоземельных элементов из кремнеземистого остатка эвдиалитового концентрата // Изв. вузов. Цв. металлургия. 1983. № 6. С. 111–112.
- 3 Дибров И. А., Чиркст Д. Э., Литвинова Т. Е. Термодинамическое исследование кислотного вскрытия эвдиалитового концентрата // Журн. приклад. химии. 1996. Т. 69, № 5. С. 727–730.
- 4 Балашова О. М. Термохимический анализ разложения эвдиалитового концентрата серной кислотой // Изв. вузов. Цв. металлургия. 1997. № 6. С. 20–23.
- 5 Дибров И. А., Чиркст Д. Э., Литвинова Т. Е. Распределение элементов при сернокислотной переработке эвдиалитового концентрата // Цв. металлы. 2002. № 12. С. 38–41.
- 6 Матвеев В. А., Майоров Д. В., Соловьев А. В. Комплексная технология сернокислотной переработки эвдиалитового концентрата // Цв. металлы. 2018. № 1. С. 20–27.
- 7 Пат. RU2649606C1, 2018.
- 8 Литвинова Т. Е. Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2014. 318 с.
- 9 Флейшер М. Словарь минеральных видов. М.: Мир, 1990. 206 с.
- 10 Локшин Э. П. Сорбционная конверсия – перспективный метод переработки редкоземельного сырья // Тр. КНЦ РАН. Химия и материаловедение. 2018. Т. 9, № 2-1. С. 154–159.
- 11 Локшин Э. П., Елизарова И. Р., Рыскина М. П., Тареева О. А. О составе эвдиалитового концентрата // Цв. металлы. 2018. № 2. С. 1–14.
- 12 Локшин Э. П., Тареева О. А., Елизарова И. Р. Новый подход к переработке апатитового концентрата // Журн. приклад. химии. 2016. Т. 89, № 7. С. 887–893.
- 13 Локшин Э. П., Тареева О. А., Елизарова И. Р. О потерях редких элементов при кислотной переработке эвдиалитового концентрата // Химия уст. разв. 2018. Т. 26, № 2. С. 167–173.