

УДК 661.846.321

DOI: 10.15372/KhUR2024534

EDN: ANTBWA

Азотнокислотная переработка серпентинитов Каракалпакского месторождения

Г. Д. САПАРОВА¹, Б. Х. КУЧАРОВ², М. С. ДЖАНДУЛЛАЕВА³, А. У. ЭРКАЕВ³, Б. С. ЗАКИРОВ²

¹Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук,
Каракалпакское отделение АН Республики Узбекистан,
Нукус (Узбекистан)

²Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан,
Ташкент (Узбекистан)

³Ташкентский химико-технологический институт,
Ташкент (Узбекистан)

E-mail: gulnor-sayler@mail.ru

(Поступила 15.03.2023; после доработки 12.09.2023)

Аннотация

Разработаны физико-химические основы технологии азотнокислотной переработки серпентинита Каракалпакского месторождения с получением чистого нитрата магния и магнийсодержащего азотного сложного удобрения. Изучен химический и минералогический состав серпентинита Каракалпакского месторождения. Рентгенофазовым, микроскопическим и термогравиметрическим методами анализа установлено, что образец серпентинита содержит клиноэнстатит, пироп, шпинель, магнетиты и другие минералы с различной кристаллической структурой. Приведены данные по извлечению компонентов серпентинита в азотной кислоте путем разложения при различных условиях (температура, продолжительность, концентрация азотной кислоты). Осуществлены последующие стадии обработки азотнокислотной вытяжки: удаление кремнеземистого остатка, аммонизация фильтрата с целью осаждения нежелательных примесей для получения нитрата магния. Изучен процесс упаривания и кристаллизации фильтрата с получением чистого нитрата магния.

Ключевые слова: нитрат магния, серпентинит, переработка, азотнокислотная переработка, удобрения

ВВЕДЕНИЕ

Нитрат магния нашел широкое применение во многих отраслях химической индустрии. Благодаря своим свойствам он стал обязательным компонентом множества технологических процессов в самых разных сферах производства [1].

Химическая переработка некондиционных магнийсодержащих материалов (доломит, тальк, серпентинит и др.), по нашему мнению, представляет практический интерес, если учесть недостаточную обеспеченность сельского хозяйства Республики Узбекистан магнийсодержащими удобрениями [2].

В Узбекистане имеются запасы силикатных магнийсодержащих горных пород, состоящих в основном из минералов группы серпентинита, таких как лизардит, хризотил, антигорит и др. Для получения соединений магния из местных сырьевых ресурсов необходима их комплексная переработка, что позволит извлекать из них все полезные компоненты и производить готовые товарные продукты [3].

За последние годы появилось множество технологических схем по комплексной переработке серпентинитов, в основе которых лежат такие химические процессы, как выщелачивание или спекание [4–12]. Каждое месторождение при-

родного серпентинита по-своему уникально (ввиду непостоянства минералогического состава и свойств), поэтому известные технологии неприменимы для переработки каракалпакского серпентинита. Поисковые работы с целью оценки возможностей добычи каракалпакского серпентинита проводились многими геологами [13]; подсчитанные прогнозные ресурсы серпентинитов до глубины 50 м при протяженности 13,5 км, ширине выхода 150 м, объемном весе 2,57 кг составляют 270 млн т. Исходя из особенностей любого сырья, требуются отдельные научные и технологические исследования для подбора оптимальных условий его переработки.

Магний повышает урожайность сельскохозяйственных культур. Минеральные удобрения, производимые в Узбекистане, как правило, не содержат магний. Республика Узбекистан испытывает потребность в переработке собственного магнийсодержащего сырья, которое в настоящее время импортируется. Такие аспекты, как локализация импортированного сырья, полупабрикатов и использование природных ресурсов, обуславливают повышенный интерес к серпентиниту внутри Узбекистана. Исходя из этого, исследования, направленные на разработку физико-химических основ и технологии переработки серпентинита Каракалпакского месторождения в нитрат магния с одновременным получением магнийсодержащих азотных удобрений, весьма актуальны, что является одной из основных задач настоящей работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение элементного состава и морфологические исследования проведены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM-EVO MA 10 (Zeiss, Германия) и методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на локальном участке с использованием энергодисперсионного элементного анализатора Aztec Energy Advanced X-act SDD (Oxford Instrument, Великобритания). Дан-

ные об элементном составе представлены электронными фотографиями с выделенными локальными участками, таблицей состава, а также графическим спектром.

Измерения фазовых характеристик исследуемого образца проводились с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра Еmpyrean (Panalytical, Нидерланды), оснащенного медной трубкой ($K_{\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$). Весь контроль над работой оборудования осуществлялся посредством компьютера с использованием программы Data Collector, а анализ рентгенограмм проводился в программе High Score с использованием базы данных PDF 2013. Измерения выполнялись при комнатной температуре в интервале углов 2θ от 5 до 90° , в режиме пошагового сканирования с шагом 0.013° и временем накопления сигнала в точке 5 с.

Термический анализ образцов (ТГ, ДСК) осуществляли с использованием синхронного термоанализатора STA PT 1600 (Linseis, США). Измерения проводили в окислительной среде со скоростью $20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Для анализа жидких фаз использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Измерения проводили на высокочувствительном многоэлементном анализаторе ICP-MS 7700 (Agilent Technologies, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании химического, рентгенографического и термического методов анализа установлен минералогический состав серпентинита Каракалпакского месторождения. Согласно данным химического анализа, серпентинит Каракалпакского месторождения содержит 33–34 мас. % MgO и 41–42 мас. % SiO_2 (табл. 1).

Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА), в исходном серпентините идентифицированы рефлексы, относящиеся к фазам алюмосиликата магния $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ [01-089-5686], SiO_2 [01-073-3412], Mg_4Zn_7 [03-065-1260], а также к фазам магнетита $(\text{Mg}_{0.198}\text{Fe}_{0.802})(\text{Mg}_{0.802}\text{Fe}_{1.198})\text{O}_4$ [01-076-2846]), бирнессита $(\text{Na}_{0.58}(\text{Mn}_2\text{O}_4)(\text{H}_2\text{O})_{1.38})$.

ТАБЛИЦА 1

Химический анализ серпентинита, мас. %

Номер пробы	MgO	FeO	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Na_2O	SiO_2	Потери при прокаливании
1	33.06	1.62	6.63	2.47	1.82	1.56	41.42	11.42
2	33.00	2.20	6.83	2.21	4.76	0.08	40.29	11.52

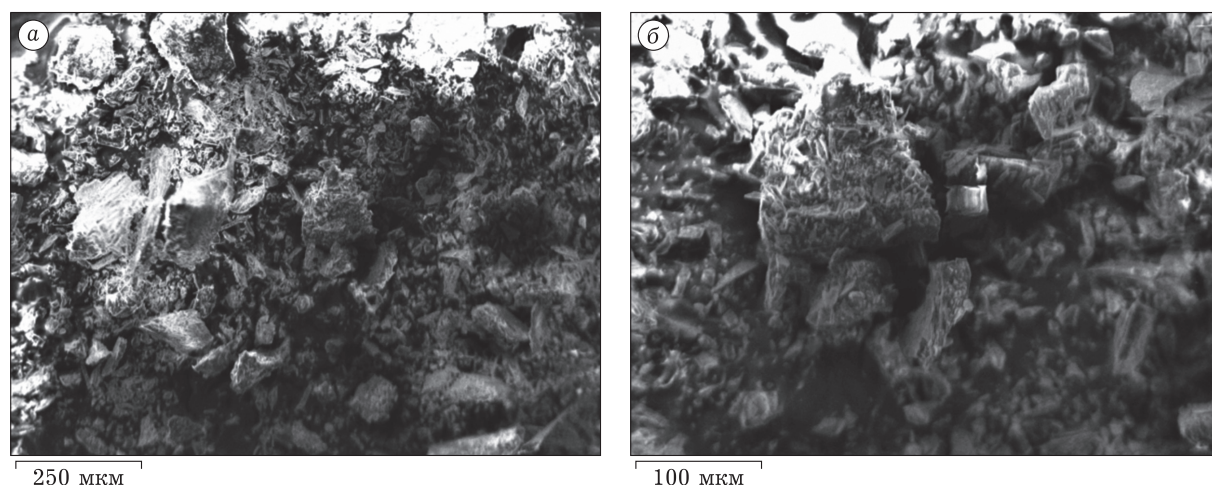


Рис. 1. СЭМ-изображения исходного серпентинита при разном увеличении [14].

доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ [01-075-3697]), шпинели (MgAl_2O_4 [00-021-1152]), клиноэнстатита (MgSiO_3 [01-076-1931]) и пиропса ($\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ [01-080-5007]) [14].

Серпентинит Каракалпакского месторождения неоднородный по структуре. На рис. 1 просматриваются несколько различных по форме частиц, относящихся к разным минералам.

Следующим этапом стало проведение исследований по подбору оптимальных условий выщелачивания, при которых из серпентинита макси-

мально извлекаются все ценные компоненты. При норме азотной кислоты, которая составляла 100 % относительно суммы оксидов металлов, технологические параметры процесса варьировались в следующих диапазонах: концентрация азотной кислоты – 30–50 мас. %, температура процесса – 40–95 °С, продолжительность процесса – 30–240 мин.

Для выщелачивания использовали реактор смешения – колбу-реактор в термостате, в ко-

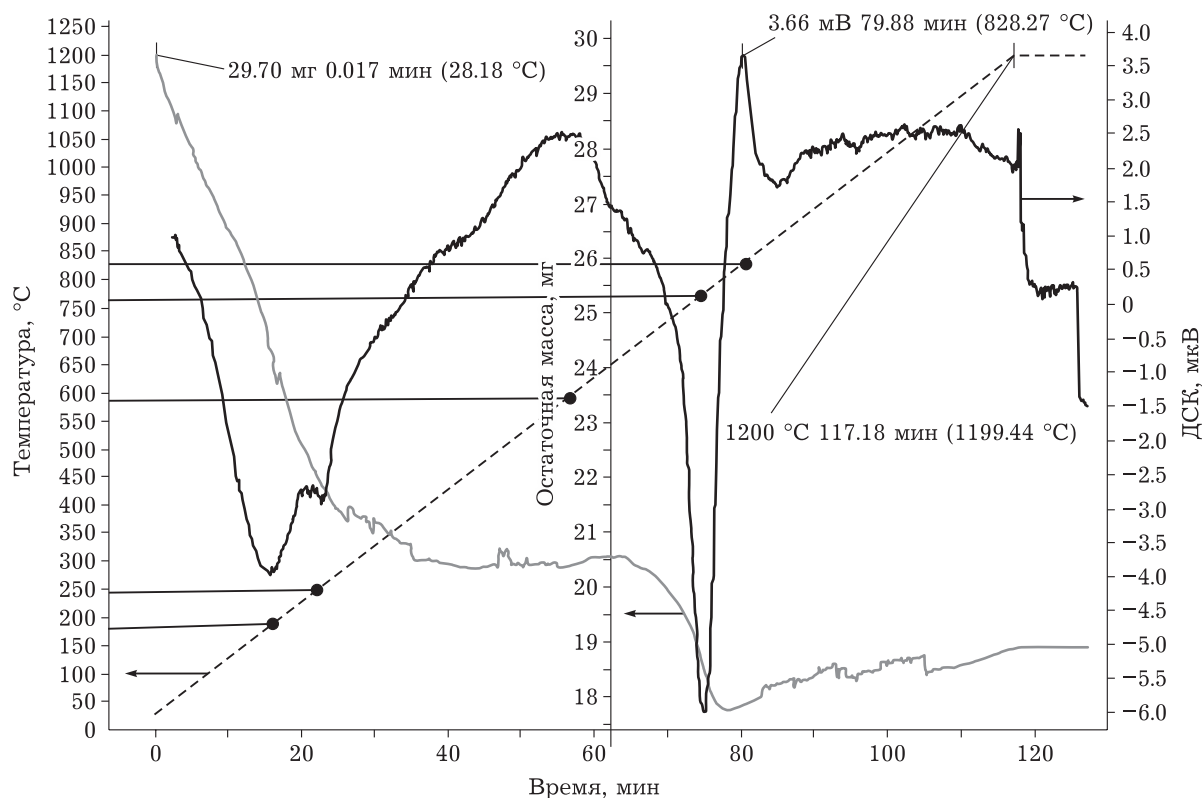


Рис. 2. Дериватограмма серпентинита [14].

ТАБЛИЦА 2

Влияние технологических параметров на аналитические показатели азотнокислотного разложения термообработанного серпентинита

Номер образца	Температура термообработки, °С	Продолжительность термообработки, мин	Концентрация HNO_3 , %	Продолжительность процесса разложения, мин	Температура процесса разложения, °С	Соотношение Ж : Т* в суспензии после разложения	Плотность жидкой фазы, г/см ³	Степень извлечения MgO в жидкую фазу, %
1	450	30	30	30	95	4.0 : 1	1.2240	26.2
2	450	60	30	60	95	4 : 1	1.2166	28.5
3	450	90	30	90	95	3.9 : 1	1.2025	27.2
4	587	90	30	90	95	2.9 : 1	1.1010	22.2
5	765	90	30	90	95	1 : 1	1.1860	57.2
6	800	60	30	30	70	1 : 1.9	1.6160	46.3
7	800	60	30	30	80	1 : 1.3	1.1430	67.4
8	800	60	30	30	95	1 : 1.6	1.1899	58.1
9	800	60	25	30	70	1 : 2.16	1.1500	49.2
10	800	60	25	30	80	1 : 1.5	1.1130	54.4
11	800	60	25	30	95	1 : 1.7	1.2677	53.0
12	800	30	30	120	95	1 : 1.3	1.2826	66.5
13	800	60	30	120	95	1 : 1.25	1.3232	72.2
14	800	90	30	120	95	1 : 1.1	1.0394	75.2
15	800	90	30	30	95	1 : 1.05	1.6360	68.2
16	800	90	30	60	95	1 : 1.07	1.1300	68.3
17	800	90	30	90	95	1 : 1.1	1.1970	73.3
18	800	60	35	30	70	1.25 : 1	1.3220	51.4
19	800	60	35	30	80	1.3 : 1	1.3049	53.4
20	800	60	35	30	95	1.15 : 1	1.4507	63.3
21	800	60	30	30	95	1 : 0.9	1.2863	70.0

* Ж – жидкое; Т – твердое.

торую приливали азотную кислоту в определенной концентрации. Кислота подавалась исходя из расчета растворения всех металлов, находящихся в серпентините. Затем при достижении заданной температуры добавляли серпентинит с размером частиц менее 0.315 мм. После кислотной обработки полученную суспензию отделяли от нерастворяющегося кремнеземистого остатка фильтрованием. Авторы [15] показали, что при разложении исходного серпентинита выход оксида магния в жидкую фазу составил 24.4 %, а при использовании термообработанного серпентинита выход увеличивался более чем вдвое. Поэтому было изучено влияние температуры термообработки исходного серпентинита на выход оксида магния.

На дериватограмме серпентинита определяются четкие пики, связанные со ступенчатой дегидратацией минерала (рис. 2). Первый дублетный эндотермический эффект, связанный с удалением адсорбированной воды, наблюдается в интервале температур 200–270 °С

(по ТГ-кривой потеря массы в этой области составляет 27.5 %). Второй эндотермический эффект обусловлен образованием структуры Mg_2SiO_4 , формирующейся при дегидратации и рекристаллизации минерала (относительная потеря массы составляет 8.75 %).

Как отмечалось выше, при разложении исходного серпентинита содержание и выход оксида магния в виде нитрата магния составляют 2.99 и 24.4 % соответственно, а при разложении термообработанного серпентинита в зависимости от температуры эти показатели повышаются до 8.46 и 75 % соответственно. Например, при 450, 587, 765 и 800 °С и одинаковых значениях других параметров в опытах 3, 4, 5 и 17 (табл. 2) выход оксида магния в жидкую фазу составляет 27.2, 22.2, 57.2 и 73.3 % соответственно.

В табл. 3 приведен элементный состав азотнокислотной вытяжки серпентинита по данным метода ИСП-МС. Видно, что содержание Al, Cr, Fe и Ni в фильтрате составляет сотые доли от концентрации магния. Алюминий и железо слу-

ТАБЛИЦА 3

Элементный состав азотнокислой вытяжки серпентинита по данным метода ИСП-МС

Номер образца*	Содержание, г/л								
	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	Na
6	29	0.51	0.0016	0.28	0.068	0.2	0.41	0.0052	0.055
7	36	0.64	0.002	0.36	0.084	0.25	0.52	0.0067	0.060
8	30	0.60	0.0018	0.31	0.072	0.22	0.43	0.0085	0.079
11	34	0.60	0.002	0.35	0.079	0.25	0.49	0.023	0.058
14	33	0.69	0.0019	0.36	0.093	0.27	0.47	0.006	0.049
15	27	0.55	0.001	0.33	0.073	0.23	0.41	0.0036	0.034
16	27	0.78	0.0013	0.34	0.082	0.25	0.41	0.0042	0.10
17	29	0.59	0.0015	0.33	0.076	0.24	0.44	0.0045	0.054
20	28	0.53	0.0016	0.29	0.068	0.21	0.41	0.0039	0.054
21	24	0.47	0.0014	0.27	0.063	0.2	0.32	0.0051	0.049

* Номер образца соответствует номеру в табл. 2.

жат исходными веществами для получения коагулянтов. Хром-никель-марганцевый концентрат – сырье для получения солей указанных металлов. Также в табл. 4 приведены результаты химического анализа жидкой фазы азотнокислотной вытяжки.

Также было изучено влияние технологических параметров (соотношение осадок/вода, условия промывки) на эффективность промывки нерастворимого осадка. Условия промывки: 1) декантация, путем сливания определенного количества воды с отстоявшегося осадка на воронке с фильтром (без перемешивания); 2) промывание на фильтре после фильтрации осадка определенным количеством воды (при перемешивании). Результаты исследования представлены в табл. 5.

Из полученных данных следует, что с увеличением количества воды для промывки в 2 раза степень промывки возрастает без перемешивания от 26.4 до 59.1 %, а при перемешивании – с 51.3 до 68.2 %. Выполнение перемешивания при промывке обеспечивает увеличение степени промывки на 24.9 % (при соотношении осадок/вода = 1 : 1) и на 9.1 % (при соотношении осадок/вода = 1 : 2), при этом скорость фильтрации повышается в 3–4 раза по сравнению с промывкой без перемешивания.

На рис. 3 представлены СЭМ-изображения и ЭДС-спектры нерастворенного осадка, полученного после азотнокислотного выщелачивания серпентинита. По полученным данным, содержание Si в осадке после промывки (см. рис. 3, б) составляет 36.7–38.4, Ca – 0.1–0.2, Mg – 4.9–6.1, Al – 0.9–1.0 мас. %. В то же время, по данным РФА, нерастворенный осадок после промывки содержит 83 % алюмосиликата кальция

($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [01-075-1587]) и 17 % силиката магния-кальция (CaMgSiO_4 [01-075-1569]). Следовательно, 70–76 % SiO_2 находится в аморфной форме, а остальная часть (24–30 % от общей массы) – в виде кристаллической фазы, состоящей из силикатов кальция-алюминия и кальция-магния.

Далее изучен процесс выделения нитрата магния из азотнокислотных вытяжек серпентинита. Для осаждения оксидов железа и алюминия в жидкой фазе азотнокислотную вытяжку аммонизировали от pH 1 до pH 6. Аммонизированные растворы фильтровали и отделяли от примесей. Результаты анализа состава аммонизированных растворов и влияния технологических параметров на процесс аммонизации приведены в табл. 6 и 7 соответственно.

Как видно из данных табл. 6, при увеличении pH растворов от 0.56 до 6.03 ед. концентрация примесей алюминия и железа уменьшилась от 0.47 и 0.12 до 0.0001 и 0.00066 г/л соответственно. Показано, что с ростом pH до 3.1–3.7 ед. концентрация магния в растворе возрастает от 24.0 до 73.0 г/л, при этом почти полностью выпадают в осадок примесные оксиды типа M_2O_3 (где M = Al, Fe, Cr, Mn), а в растворе остаются растворимые нитраты магния и аммония. Установлено, что при дальнейшем повышении pH до 6.03 ед. часть магния осаждается, и концентрация ионов магния в растворе снижается до 31 г/л соответственно.

После проведения процессов аммонизации и упаривания полученного осадка до твердого состояния можно получить азотно-магниевое удобрение с содержанием примесей алюминия и железа 0.02 и 0.012 мас. % соответственно. В результате аммонизации, проведенной при pH

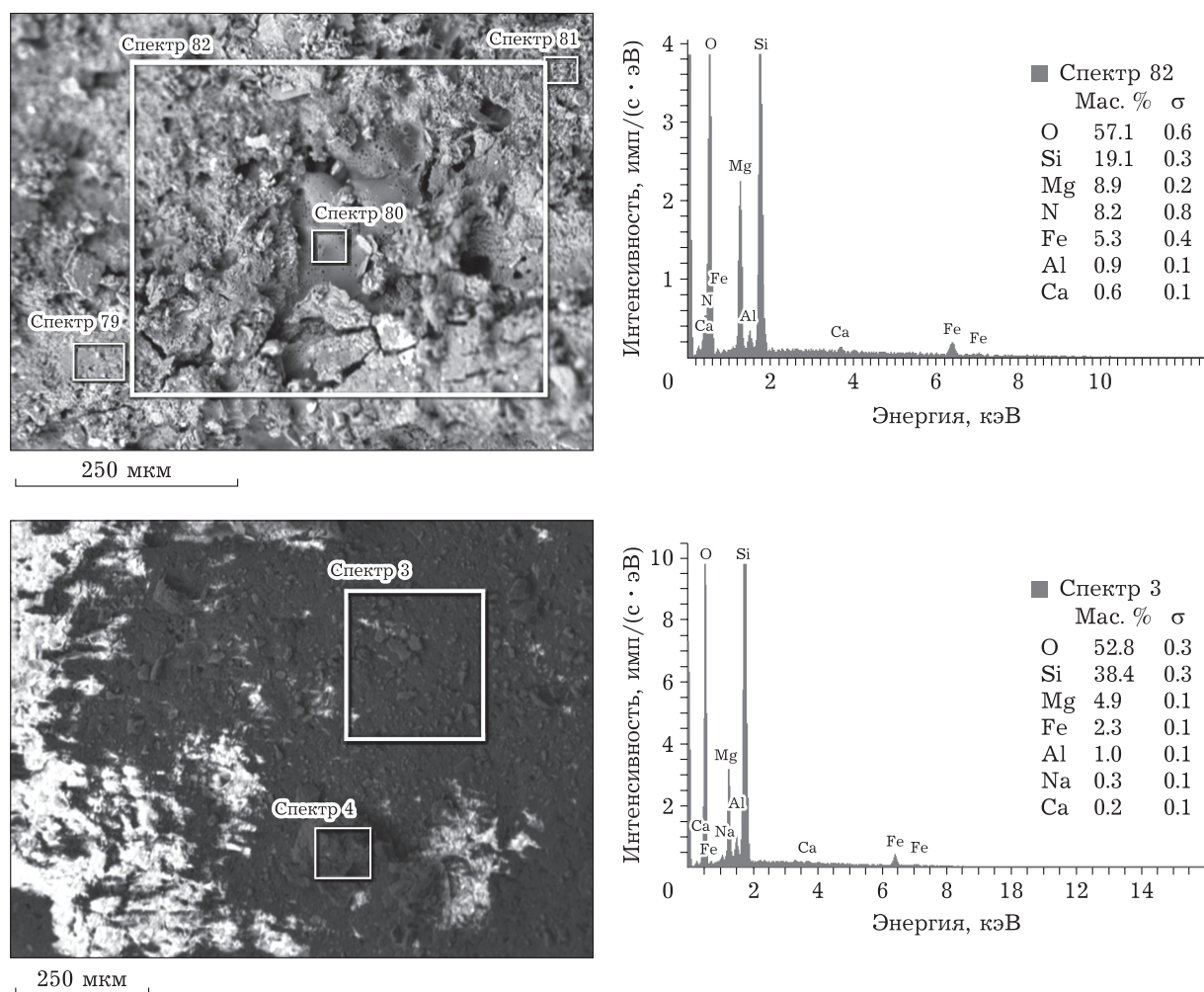


Рис. 3. Микрофотографии и ЭДС-спектры нерастворимого осадка до (а) и после (б) промывки.

растворов 3, 4 и 5, были получены образцы азотно-магниевого удобрения с суммой питательных элементов (азот + магний) 39.5; 44.2 и 41.46 мас. %, в частности азота – 21.86; 22.5; 23.86 мас. % (из них 5.44; 4.74; 6.7 мас. % в аммонийной форме), магния – 18.3; 21.7; 17.4 мас. % соответственно.

ТАБЛИЦА 4

Химический состав жидкой фазы азотнокислотной вытяжки

Номера образца*	Содержание компонентов, %				
	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1	1.88	0.129	0.20	0.04	0.01
2	1.87	0.122	0.24	–	0.01
3	1.50	0.124	0.24	–	0.01
12	6.78	0.133	0.24	–	0.01
13	7.28	0.129	0.24	–	0.01
14	7.95	0.136	0.30	–	0.01

* Номер образца соответствует номеру в табл. 2.

Поскольку в различных отраслях народного хозяйства требуется чистый нитрат магния, нами изучена возможность получения гексагидрата нитрата магния из азотнокислотной вытяжки серпентинита Каракалпакстана.

Исследовано влияние технологических параметров стадий аммонизации, упаривания и кристаллизации азотнокислотной вытяжки серпентинита на чистоту полученного гексагидрата нитрата магния. Как показали опыты, в процессе аммонизации и кристаллизации вместе с кристаллами гексагидрата нитрата магния образуется и нитрат аммония в концентрации от 6 до 21 %, что зависит от степени упаривания и количества азотной кислоты.

В этой связи для получения более чистого гексагидрата нитрата магния продукты кристаллизации промывали насыщенным раствором нитрата магния при 10 °С. Содержание аммонийного азота уменьшилось до 0.012 %, что согласно ГОСТ 11088-75 соответствует квали-

ТАБЛИЦА 5

Влияния технологических параметров
(соотношение осадок/вода, перемешивание)
на эффективность промывки осадка

Масса, г		Содержание MgO, мас. %		Степень промывки, %
Осадок	Вода	Жидкая фаза	Твердая фаза	
Без перемешивания				
10	10	1.71	8.86	26.4
10	15	1.47	8.36	36.4
10	20	1.84	7.51	59.1
При перемешивании				
10	10	1.81	6.06	51.3
10	15	1.54	5.34	59.7
10	20	1.33	4.50	68.2
10	40	1.22	2.30	95.6

ТАБЛИЦА 6

Результаты анализа состава аммонизированных растворов методом ИСП-МС

Номер	pH	Содержание элемента, г/л						
		Na	Mg	Al	Fe	Ca	Cr	Mn
Исходный раствор	0.56	0.043	24.0	0.47	0.12	0.0014	0.37	0.067
1	0.96	0.12	67.0	0.0013	0.18	0.0035	0.9	0.18
2	1.49	0.11	64.0	0.0012	0.026	0.001392	0.41	0.16
3	2.17	0.14	72.0	0.0014	0.0071	0.001393	0.098	0.22
4	2.48	0.13	71.5	0.84	0.036	0.001394	0.13	0.2
5	3.10	0.13	73.0	0.05	0.00083	0.001395	0.005	0.18
6	3.51	0.10	71.0	0.029	0.00059	0.001396	0.0015	0.16
7	4.70	0.091	59.0	0.0018	0.00064	0.001397	0.00034	0.13
8	5.08	0.076	46.0	0.0019	0.00069	0.001398	0.00063	0.091
9	6.03	0.058	31.0	0.0001	0.00066	0.001399	0.00014	0.01

ТАБЛИЦА 7

Влияние технологических параметров
на процесс аммонизации азотнокислотной вытяжки

Номер	pH	Соотношение Ж : Т* в системе после аммонизации	Реологические свойства жидких фаз при 20 °С	
			Плотность, г/см ³	Вязкость, см ² /с
1	0.96	19.7 : 1	1.255	1.559
2	1.49	9.4 : 1	1.258	1.456
3	2.17	6.9 : 1	1.288	1.628
4	2.48	7.2 : 1	1.302	1.662
5	3.10	4.0 : 1	1.276	1.459
6	3.51	3.6 : 1	1.245	1.313
7	4.70	4.2 : 1	1.275	1.335
8	5.08	4.5 : 1	1.278	1.418
9	6.03	1.7 : 1	1.249	1.461

*Ж – жидкое; Т – твердое.

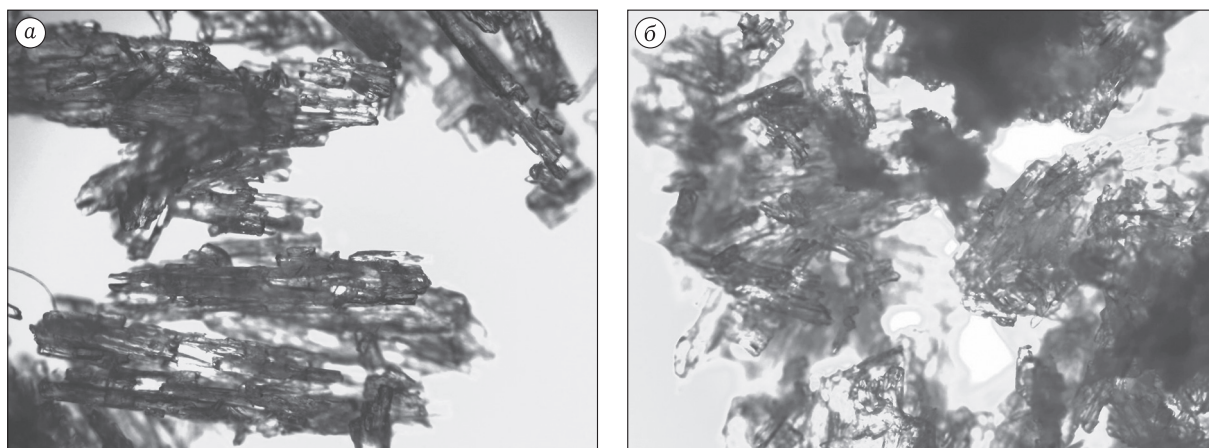


Рис. 4. Микрофотография кристаллов гексагидрата нитрата магния, полученного из серпентинита Каракалпакского месторождения.

фикации “ч.” гексагидрата нитрата магния. Микрофотографии кристаллов гексагидрата нитрата магния, полученного из серпентинита Каракалпакского месторождения, представлены на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании химического, рентгенофазового и термического методов анализа установлен минералогический состав серпентинита Каракалпакского месторождения. Серпентинитовая руда имеет следующий состав, мас. %: SiO_2 40.29, CaO 4.76, Al_2O_3 2.21, Fe_2O_3 8.83, MgO 33.0, TiO_2 0.08, CaO 0.86, SO_3 0.10, потери при прокаливании 11.52. Изучен механизм превращений силикатно-магниевого компонента руды при воздействии температуры и азотной кислоты. Как показали опыты, максимальная степень выщелачивания растворимых компонентов серпентинита (75.2 %) достигнута при разложении азотной кислотой при 95 °С в течение 120 мин при предварительной термообработке (800 °С, 60 мин). В качестве оптимальных условий процесса рекомендованы следующие: концентрация используемых кислот – 30 %, общая норма расхода кислот на разложение кислоторастворимых компонентов сырья – 100 % от стехиометрической. По окончании процесса разложения пульпу разделяли на жидкую и твердую фазы методом вакуумного фильтрования. Анализ высушенного и мытого осадка показал, что в указанных условиях основные компоненты руды извлекаются в раствор почти количественно, в то время как степень выхода MgO достигает 95 %. Установлено, что около 9.8–10.0 % MgO остается в составе осадка, в основном из-за влажности шлама. На следующем этапе процесса полу-

ченный фильтрат (содержащий нитрат магния азотнокислый раствор) подвергался аммонизации. После отделения солей алюминия и железа в виде осадка фильтрацией оставшийся раствор, состоящий в основном из нитратов магния и аммония, упаривали; потеря массы составляла 30–60 %. Основная часть магния остается в азотнокислом растворе. Полученный фильтрат рекомендуется перерабатывать в комплексные азотно-натриевые удобрения. Насыщенный раствор охлаждали до 20 °С в кристаллизаторе. Полученные кристаллы отделяли фильтрованием, промывали насыщенным раствором нитрата магния. Результаты химического анализа показывают, что в зависимости от степени аммонизации и промывки в гексагидрате нитрата магния содержится: $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (до 98 мас. %), NH_4NO_3 (0.2–1 мас. %), Fe_2O_3 (<0.001 мас. %), CaO (<0.001 мас. %), что согласно ГОСТ 11088-75 соответствует квалификации “ч.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лановецкий С. В., Пойлов В. З. Технология получения чистых веществ: Физико-химические основы кристаллизации и технологий получения гексагидрата нитрата и оксида магния реактивной чистоты. Lambert Academic Publishing (LAP), 2011. 156 с.
- 2 Дадаходжаев А. Т., Ахмедов М. Э., Гуро В. П. Разработка технологии производства сложного азот-калий-кальций-магниевого удобрения // *Universum: химия и биология*. 2019. № 2 (56). С. 16–20.
- 3 Умиров Ф. Э., Шодикулов Ж. М., Салимжанова Ш. Получение хлорида магния на основе минерала серпентинита Карманинского месторождения // *Материалы конференции*. Нукус, Узбекистан, 2021. С. 134–137 [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/356592140_POLUCENIA_HLORIDA_MAGNIA_NA_OSNOVE_MINERALA_SERPENTINITA_KARMANINSKOGO_MESTOROZDENIA (дата обращения: 12.03.2023).

- 4 Пат. RU 2292300 C1, 2007.
- 5 Сагарунян С. А., Макарян И. М., Арустамян А. Г., Назарян Э. М., Сагарунян А. С. Исследование процессов комплексной переработки серпентинитов // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т.9, № 2-1. С. 187–191.
- 6 Гаприндашвили В. Н., Гогичадзе Л. К. Азотнокислотная переработка грузинских серпентинитов // Сообщения Академии наук Грузинской ССР. 1965. Т. 38, № 2. С. 295–301.
- 7 Зулумян Н. О., Оганесян Э. Б., Оганесян З. Г., Караханян С. С. О термокислотной обработке серпентинитов северо-восточного побережья озера Севан // Доклады НАН РА. Неорганическая химия. 2002. Т. 102, № 3. С. 55–58.
- 8 Нажарова Л. Н. Солянокислотная переработка серпентинита: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1999. 16 с.
- 9 Гаприндашвили В. Н., Курдеванидзе М. К. Сернокислотный способ комплексной переработки местных серпентинитов // Исследование по химической переработке руд. Ред. Л. А. Драгин и др. Тбилиси: Мецниереба, 1966. С. 20–25.
- 10 Велинский В. В., Каминский Ю. Д., Лебедев В. И., Самданчап Т. Х. Гидрометаллургическая переработка серпентинитовых отходов Ак-Довуракского асбестового месторождения // Материалы респ. расшир. науч.-практ. совещ. “О концепции промышленного развития Республики Тыва”. Кызыл, 1997. С. 75–76.
- 11 Pirimov T. J., Namazov Sh. S., Seytnazarov A. R., Temirov U. Sh., Usanbaev N. Kh. Obtaining of magnesium oxide from serpentinites of the Arvaten deposit of Uzbekistan // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29, No. S8. P. 1619–1627.
- 12 Овчинникова Н. Б., Фрейдлина Р. Г., Дудина М. В., Яковлева С. А., Тетерин В. В., Кочелаев В. А. Исследование выщелачивания серпентинита соляной кислотой // Депонированная рукопись ВИНТИ № 996-B2004. 10.06.2004.
- 13 Асабаев Д. Х., Бадалов Ф. А., Эргашов А. М. Оценка минерально-сырьевого потенциала магниезиальных пород и перспективы рационального его использования в Западном Узбекистане (Южный Тянь-Шань) // Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences. 2022. Vol. 2, No. 11. P. 259–275.
- 14 Saparova G., Dzhandullaeva M., Erkaev A. U., Kucharov B. Kh. Studies of the chemical and mineral composition of serpentinite of the Karakalpak deposit // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2022. Vol. 9, No. 8. P. 19666–19670.
- 15 Saparova G. D., Zhandullaeva M., Erkayev A. U., Kucharov B. K., Bauatdinov S. Study of the process of isolation of magnesium compounds from serpentinite // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2023. No. 1–2. P. 38–42.