УДК 553.493:553.08(574)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-83-91

ПОВЕДЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И ВАНАДИЯ ПРИ ВСКРЫТИИ ЧИЛИСАЙСКИХ ФОСФОРИТОВ

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, Д.К. Айткулов, Е.К. Назаров, А.Б. Сагындыков

Аннотация. Исследовано поведение редкоземельных металлов и ванадия при сернокислотном вскрытии обогащённых фосфоритов Чилисайского месторождения. Проведены минералогические, химические и фазовые исследования исходного сырья, концентратов, экстракционной фосфорной кислоты и фосфогипса с использованием рентгенофлуоресцентного анализа, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что суммарное содержание редкоземельных металлов в концентрате составляет 0,08–0,12 %, а ванадия – 0,05–0,09 %. Показано, что при сернокислотном вскрытии основная часть редкоземельных металлов (до 80–85 %) концентрируется в фосфогипсе вследствие соосаждения с сульфатом кальция, образования труднорастворимых фторидов и кремнефторидов, а также изоморфного включения в кристаллическую решётку фосфогипса. В отличие от редкоземельных металлов, ванадий практически полностью переходит в раствор экстракционной фосфорной кислоты благодаря образованию устойчивых фосфатных и сульфатных комплексов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий комплексной переработки чилисайских фосфоритов с попутным извлечением редкоземельных элементов и ванадия.

Ключевые слова: фосфориты месторождения Чилисай; редкоземельные металлы; ванадий; сернокислотное вскрытие; экстракционная фосфорная кислота; фосфогипс.

ЧИЛИСАЙ ФОСФОРИТТЕРИН АЧУУ УЧУРУНДАГЫ СЕЙРЕК ЖЕР МЕТАЛЛДАРЫНЫН ЖАНА ВАНАДИЙДИН ЖҮРҮМ-ТУРУМУ

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, Д.К. Айткулов, Е.К. Назаров, А.Б. Сагындыков

Аннотация. Макалада Чилисай кенинде байытылган фосфориттерди күкүрт кислотасы менен бөлүп алуу учурунда сейрек кездешүүчү жер металлдарынын жана ванадийдин жүрүм-туруму изилденген. Чийки заттын, концентраттардын, нымдуу процесстеги фосфор кислотасынын жана фосфогипстин минералогиялык, химиялык жана фазалык изилдөөлөрү рентген флуоресценциялык анализ, рентген дифракциялык анализ, сканерлөөчү электрондук микроскопия жана индуктивдүү байланышкан плазма массалык спектрометриясы аркылуу жүргүзүлгөн. Концентраттагы сейрек кездешүүчү жер металлдарынын жалпы курамы 0,08–0,12%, ал эми ванадийдин курамы 0,05–0,09% түзгөн. Күкүрт кислотасын бөлүп алуу учурунда сейрек кездешүүчү жер металлдарынын көпчүлүгү (80–85% га чейин) кальций сульфаты менен бирге чөкмөлөөдөн, начар эрүүчү фториддердин жана фторсиликаттардын пайда болушунан жана фосфогипстин кристаллдык торчосуна изоморфтук кошулуудан улам фосфогипсте топтолгону көрсөтүлдү. Сейрек кездешүүчү жер металлдарынан айырмаланып, ванадий туруктуу фосфат жана сульфат комплекстеринин пайда болушунан улам дээрлик толугу менен фосфор кислотасынын нымдуу процесстеги эритмесине өткөн. Алынган жыйынтыктарды сейрек кездешүүчү жер элементтерин жана ванадийди бөлүп алуу менен Чилисай фосфориттерин комплекстүү иштетүү технологияларын иштеп чыгууда колдонсо болот.

Түйүндүү сөздөр: Чилисай кенинин фосфориттери; сейрек кездешүүчү жер металлдары; ванадий; күкүрт кислотасын бөлүп алуу; фосфор кислотасын бөлүп алуу; фосфогипс.

BEHAVIOR OF RARE EARTH ELEMENTS AND VANADIUM DURING DISSEMINATION OF CHILISAI PHOSPHORITES

P.A. Osipov, R.A. Shayakhmetova, D.K. Aitkulov, E.K. Nazarov, A.B. Sagyndykov

Abstract. This study investigates the behavior of rare earth elements (REEs) and vanadium during sulfuric acid processing of beneficiated phosphorites from the Chilisai deposit. Mineralogical, chemical, and phase analyses of the raw material, concentrates, wet-process phosphoric acid, and phosphogypsum were performed using X-ray fluorescence spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and inductively coupled plasma mass spectrometry. The total REE content in the concentrate was found to be 0,08–0,12 wt.%, while vanadium content ranged from 0,05 to 0,09 wt. %. The results demonstrate that during sulfuric acid decomposition, up to 80–85 % of the rare earth elements are retained in phosphogypsum due to coprecipitation with calcium sulfate, formation of poorly soluble fluorides and fluorosilicates, and isomorphic incorporation into the phosphogypsum crystal lattice. In contrast to rare earth elements, vanadium is almost completely transferred into the wet-process phosphoric acid owing to the formation of stable phosphate and sulfate complexes. The obtained results provide a scientific basis for developing integrated processing technologies for Chilisai phosphorites with the recovery of rare earth elements and vanadium as valuable by-products.

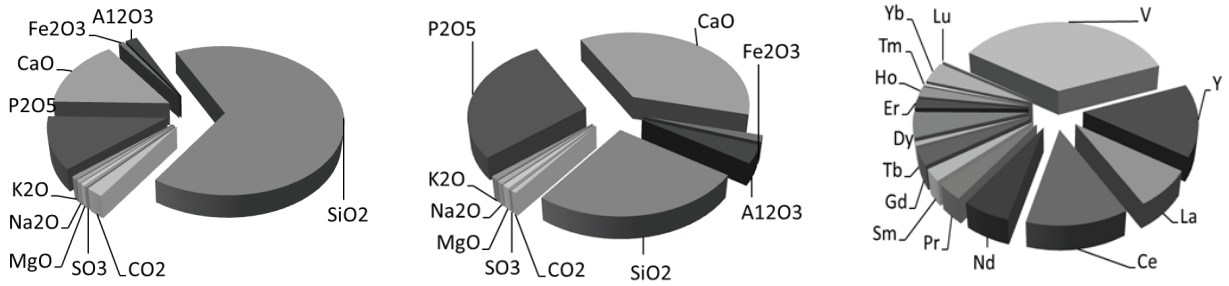
Keywords: Chilisai phosphorites; rare earth elements; vanadium; sulfuric acid decomposition; wet-process phosphoric acid; phosphogypsum.

Введение. Постоянно растущий спрос на *редкоземельные металлы* (РЗМ) и их использование в самых передовых отраслях современной промышленности требует разработки инновационных технологий извлечения их из природного сырья и техногенных отходов. Наличие РЗ элементов в природных фосфатах делает возможным выделение их концентратов в ходе получения фосфорных удобрений [1, 2]. Существенным преимуществом данного сырья является возможность попутного извлечения редкоземельных элементов без дополнительных затрат на добычу и первичное обогащение руды, а также утилизацию кислотных отходов [3–6].

Одним из приоритетных направлений развития экономики Казахстана является производство минеральных фосфатных удобрений. Суммарные запасы Чилисайского и Каратауского месторождений превышают 20 млрд тонн [7–10]. Несмотря на сравнительно низкое содержание редкоземельных и редкометалльных компонентов, представленных в основном ванадием, в фосфоритах, при крупнотоннажном производстве фосфатных удобрений их абсолютное количество в технологических продуктах и отходах становится достаточно значительным, что делает их промышленное извлечение экономически целесообразным [10–12]. Целью настоящей работы является изучение закономерностей поведения редкоземельных и редкометалльных элементов при сернокислотном вскрытии фосфорной муки месторождения Чилисай и оценка возможности получения попутных концентратов РЗМ.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены с использованием комплекса современных физико-химических методов анализа: рентгенофлуоресцентного анализатора ARL Quant›X (Thermo Electron), растрового электронного микроскопа JSM-6490LA (JEOL) с энергодисперсионным микроанализатором, дифрактометра ДРОН-4, масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой VARIAN-820MS и дериватографа Q-1000/D. Применение аттестованных методик обеспечило достоверность полученных результатов.

Исходные фосфориты Чилисайского месторождения относятся к бедным осадочным фосфоритам и характеризуются содержанием P_2O_5 порядка 10 %. После первичного простейшего обогащения, включающего промывку и мокрую классификацию для удаления глинистых примесей, и выделения песчаной фракции, содержание P_2O_5 в товарной фракции повышается до 16–18 %, что обеспечивает ее дальнейшую переработку сернокислотным способом. Флотация чилисайских фосфоритов является завершающей стадией их обогащения после промывки и классификации. Процесс основан на прямой анионной флотации фосфатных минералов с применением коллекторов на основе жирных кислот и реагентов-регуляторов. Комбинированная технология позволяет повысить содержание P_2O_5



а б в

Рисунок 1 – Химический состав образцов исходной руды (а)
и концентратов месторождения Чилисай (б, в)

в концентрате до 26–28 %, обеспечивая получение сырья, пригодного для сернокислотной переработки и производства экстракционной фосфорной кислоты.

Химический состав образцов исходной руды и концентратов месторождения Чилисай в виде диаграмм приведен на рисунке 1.

Как видно из приведенных диаграмм, содержание P_2O_5 в фосфоритах Чилисая достигает всего 9-10 % (см. рисунок 1, *а*), что значительно ниже в сравнении с фосфоритами Каратау (18 % и выше).

Вместе с тем при обогащении фосфорита Чилисая содержание P_2O_5 в концентрате повышается до 26–28 % за счет того, что фосфорсодержащий минерал находится в руде в виде крупных фракций. При этом содержание оксидов железа в образцах не превышает 1,5 % (хотя отношение Fe_2O_3 / P_2O_5 достигает 5,6 %), а доля MgO сравнительно невелика (рисунок 1, *б*).

Результаты физико-химического анализа чилисайских фосфоритов, выполненного методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), подтвердили присутствие редкоземельной фракции, а также выявили ванадий в качестве основного редкометалльного компонента. На рисунке 1, *в* представлена диаграмма относительного содержания РЗЭ и ванадия в полученных концентратах.

При этом установлено, что суммарное содержание редкоземельных элементов в фосфоритах и продуктах их обогащения составляет всего 0,08–0,12 %, а содержание редкометаллной составляющей, представленной преимущественно ванадием, находится в пределах 0,05–0,09 %. При этом соотношение элементов цериевой и иттриевой групп остаётся примерно одинаковым (рисунок 1, в), а поскольку стоимость редкоземельных металлов иттриевой группы на один–два порядка выше стоимости элементов цериевой подгруппы, то эти элементы, несмотря на их относительно малое содержание в перерабатываемом сырье, представляют существенный экономический интерес.

Дифрактограмма полуколичественного рентгенофазового анализа кристаллических фаз обогащенного концентрата приведена на рисунке 2. Все зафиксированные дифракционные пики и характерные рефлексы принадлежат исключительно кристаллическим фазам, количественное содержание которых указанно в таблице 1.

Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа кристаллических фаз образца концентрата месторождения Чилисай показали наличие в ней следующих фаз: гидроксилапатит $Ca_5(PO_4)_3(OH)$, и франколит $Ca_5(PO_4CO_3)F$, основа концентрата, являющиеся целевым фосфатным минералом (источник фосфора). SiO_2 – кварц, основная примесь оставшаяся в виде пустой породы после промывки. Суммарно с гидроксилапатитом они формируют более 86 % от общего объема кристаллической фазы образца.

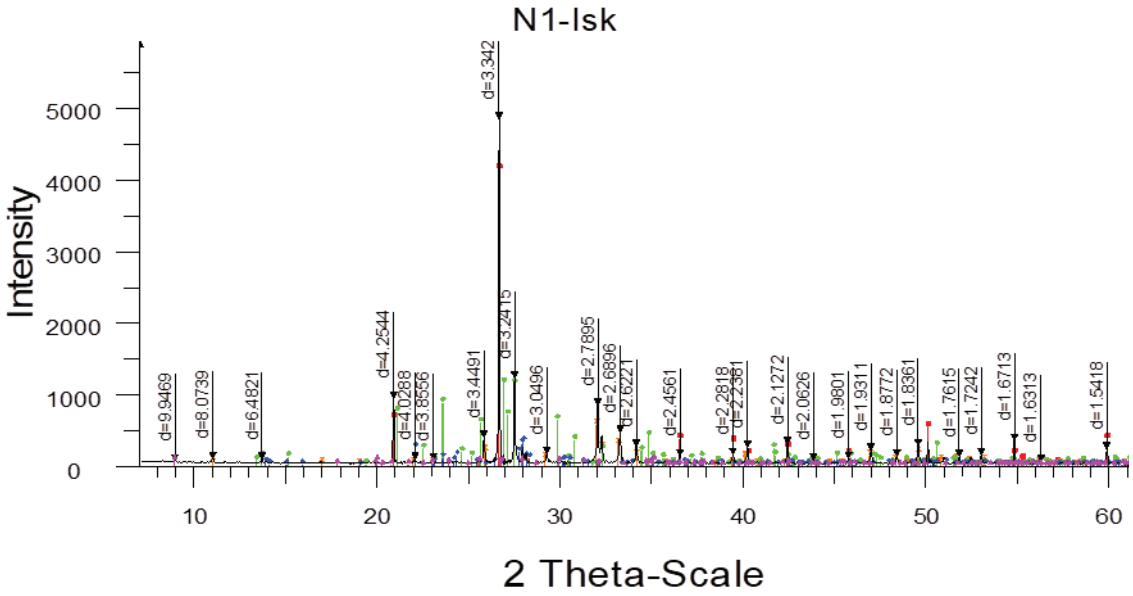


Рисунок 2 – Дифрактограмма концентрата фосфоритов месторождения Чилисай

Таблица 1 – РФА кристаллических фаз образца концентрата месторождения Чилисай

№ п/п	Минеральный состав	Формула	Количество вещества, %
1	Quartz	SiO_2	~25,1
2	Hydroxylapatite	$(PO_4)_3(OH)$	12,1
3	Francolite	$Ca_5 (PO_4,)_3 F$	49,2
4	Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	8,5
5	Albite	$Na(AlSi_3O_8)$	3,2
6	Muscovite	$KAl_2(AlSi_3)O_{10})(OH, F)_2$	1,9

$KAlSi_3O_8$, $NaAlSi_3O_8$ – ортоклаз и альбит-калиевые и натриевые полевые шпаты – типичные компоненты гранитных или осадочных пород часто сопутствующих кварцу. $KAl_2(AlSi_3)O_{10})(OH,F)_2$ – мусковит – слюда, которая часто встречается в осадочных породах. Их наличие связано со спецификой осадочного фосфоритоносного горизонта месторождения Чилисай.

Таким образом, первичная промывка руды Чилисая позволяет получить концентрат с высоким содержанием фосфатного сырья (61,3 %), эффективно удаляя основную массу кремнисто-алюмосиликатной пустой породы. Учитывая изоморфную емкость кристаллической решетки полученного фосфатного минерала, данный концентрат представляет особый интерес не только как сырье для удобрений, но и как потенциальный источник попутных редкоземельных элементов (РЗЭ).

Для получения фосфатных удобрений природное фосфатное сырьё подвергают кислотному вскрытию. При азотнокислотном вскрытии основные компоненты сырья – фосфор, кальций, редкоземельные элементы и большинство сопутствующих металлов – практически полностью переходят

в раствор [13–15]. В дальнейшем их выделяют из раствора различными методами осаждения. Данный процесс эффективен при низких содержаниях кальция.

Для фосфоритов Каратау с высоким содержанием кальция применяют сернокислотное вскрытие, при котором в раствор преимущественно переходят фосфор, алюминий и железо, тогда как кальций остается в осадке в виде фосфогипса. Вместе с образующимся фосфогипсом концентрируется и основная часть редкоземельных элементов, доля которых в твёрдой фазе может достигать 70–80 %. Данный процесс также достаточно хорошо изучен, а вопросам извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса посвящено значительное количество исследований [16, 17].

В отличие от каратауских руд, сернокислотное вскрытие чилисайских фосфоритов изучено значительно слабее. Кроме того, промышленное производство фосфатных удобрений на базе Чилисайского месторождения в настоящее время находится на стадии развития, что делает актуальными исследования, направленные на изучение закономерностей распределения редкоземельных элементов между продуктами переработки, а также на разработку технологических режимов, обеспечивающих повышение степени их извлечения в раствор.

В настоящей работе исследовано поведение редкоземельных элементов и ванадия, а также процессы их распределения между жидкой и твёрдой фазами при сернокислотном вскрытии чилисайских фосфоритов с использованием 40%-й серной кислоты.

Раствор экстракционной фосфорной кислоты получали обработкой фосфорной муки 40%-й серной кислотой при соотношении Т:Ж = 1:2,5 и температуре 60 °С. Выщелачивание проводили в течение 60 минут, что, согласно предварительным исследованиям, обеспечивает практически полное разложение фосфорита. После фильтрации и многократной промывки кека был получен раствор экстракционной фосфорной кислоты с содержанием P_2O_5 около 22 %, что соответствует промышленным показателям дигидратного способа получения экстракционной фосфорной кислоты ЭФК.

Результаты и их обсуждение. При изучении процессов сернокислотного вскрытия чилисайского фосфатного сырья была зафиксирована низкая степень перехода редкоземельных элементов в раствор. Наиболее вероятной причиной низкого извлечения является затрудненная диффузия ионов РЗЭ – в особенности цериевой группы через формирующийся слой фосфогипса.

Этот процесс сопровождается кристаллизацией сульфата кальция. Морфология и размеры образующихся кристаллов оказывают существенное влияние как на скорость фильтрации пульпы, распределение примесей, так и на степень соосаждения РЗЭ. Внешний вид кристаллов фосфогипса, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии при различном увеличении, представлен на рисунке 3.

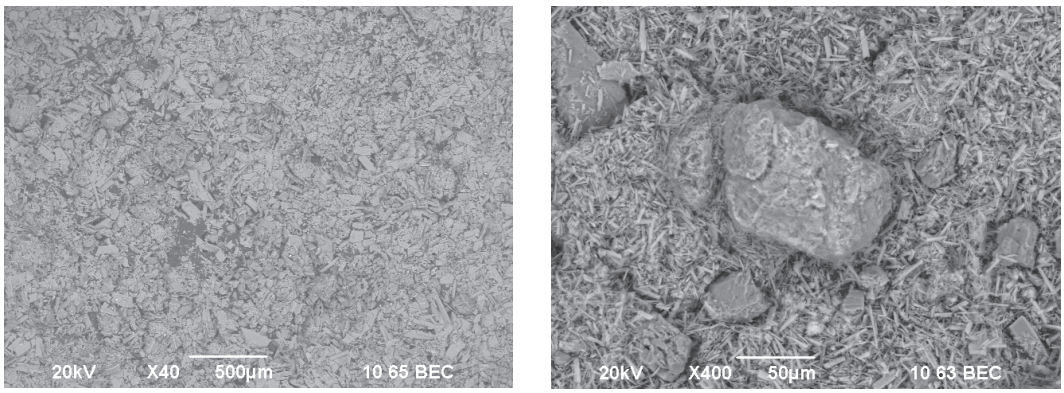
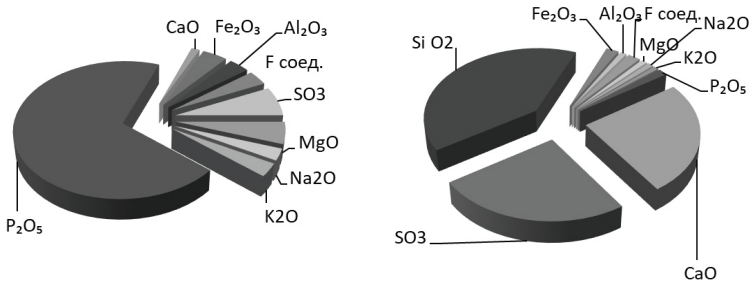
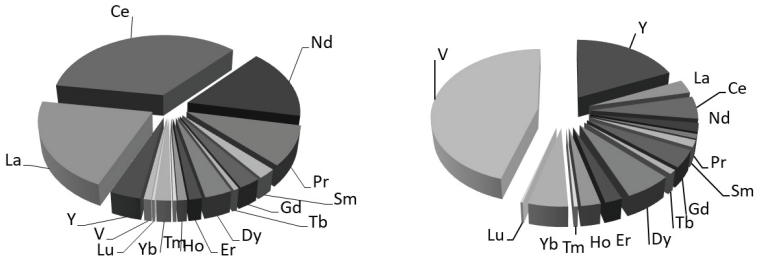


Рисунок 3 – Вид образовавшихся кристаллов фосфогипса при разном увеличении



а б

Рисунок 4 – Поэлементный состав полученной ЭФК (а) и образца фосфогипса (б), полученных при вскрытии концентратов месторождения Чилисай



а б

Рисунок 5 – Распределение редкоземельных элементов и ванадия, оставшихся в кеке (а) и перешедших в раствор (б)

Анализ микроструктуры показал, что фосфогипс представлен преимущественно игольчатыми и пластинчатыми кристаллами, между которыми могут локализоваться соединения редкоземельных элементов и другие примеси.

Распределение элементов между твёрдой и жидкой фазами представлено на рисунке 4.

По полученным данным видно, что большая часть фосфора перешла в раствор в составе экстракционной фосфорной кислоты. Одновременно в жидкую фазу перешло значительное количество примесей, включая кальций и фтор, суммарное содержание которых достигает около 25 %. В твердом остатке преимущественно сохранились фосфат кальция и кремний, тогда как содержание большинства других элементов, включая остаточный фосфор, является незначительным.

При изучении распределения редкоземельных и редкометалльных составляющей, представленной ванадием, также выявили существенные различия. На рисунке 5 представлено распределение редкоземельных элементов и ванадия между кеком и продуктивным раствором.

Установлено, что в кеке концентрируются в основном редкоземельные металлы преимущественно лёгкой группы, тяжёлые – в меньших количествах, ванадий представлен незначительной долей. В раствор переходит практически весь ванадий, а содержание тяжёлых редкоземельных элементов становится сопоставимым с содержанием элементов лёгкой группы.

Подобное поведение редкоземельной и редкометалльной составляющей можно объяснить следующим образом. Разложение франколита и гидроксилапатита серной кислотой протекает по реакциям:

$$Ca_5F(PO_4CO_3)_3 + 5H_2SO_4 \rightarrow H_3PO_4 + 5CaSO_4 + 3CO_2 + 3H_2O + HF.$$

$$Ca_5(PO_4)_3(OH) + 5H_2SO_4 \rightarrow 3H_3PO_4 + 5CaSO_4 + H_2O.$$

Редкоземельные элементы, присутствующие преимущественно в фосфатной форме могут переходить в раствор как в виде фосфатов, так и с образованием сульфатов:

$$2LnPO_4 + 3H_2SO_4 \rightarrow Ln_2(SO_4)_3 + 2H_3PO_4.$$

Часть образующихся сульфатов РЗМ способна совместно осаждаться с кальцием при формировании фосфогипса [18]:

$$Ln_2(SO_4)_3 + mCa(H_2PO_4)_2 + mH_2SO_4 \rightarrow mCaSO_4 \cdot Ln_2(SO_4)_3 + 2mH_3PO_4.$$

Разложение фосфоритов определяется характером и содержанием находящихся в них примесей. Образующиеся сульфаты редкоземельных элементов и растворённые фосфаты могут взаимодействовать с фтористоводородной кислотой с образованием малорастворимых фторидов. Степень растворения фторидов РЗМ сильно зависит как от концентрации кислоты, так и от общей солевой концентрации, причем предсказать характер их поведения в сложносолевой системе очень трудно [19–21].

Соединения редкоземельных металлов могут также взаимодействовать с образующейся в растворе кремнефтористоводородной кислотой с образованием нерастворимых кремнефторидов:

$$2LnPO_4 + H_2SiF_6 \rightarrow Ln_2(SiF_4)_3 + 2H_2PO_4,$$

$$Ln_2(SO_4)_3 + 3H_2SiF_6 \rightarrow Ln_2(SiF_4)_3 + 3H_2SO_4.$$

Оставшиеся в растворе редкоземельные металлы вместе с железом и алюминием образуют перенасыщенные растворы, из которых медленно выделяются их гидраты фосфатов:

$$LnPO_4 \rightarrow Ln_2(H_2PO_4)_3 \rightarrow Ln(H_2PO_4)_3.$$

Также фосфаты редкоземельных металлов совместно с другими примесями могут внедряются в кристаллическую решетку сульфата кальция.

Таким образом, распределение РЗМ при сернокислотном вскрытии фосфоритов может происходить по следующим направлениям:

- затруднённая диффузия ионов РЗЭ через образующийся слой фосфогипса;
- соосаждение и образование комплексных соединений с сульфатом кальция;
- образование труднорастворимых фторидов и кремнефторидов РЗЭ;
- сохранение части редкоземельных элементов в невскрытом остатке;
- переход в раствор с образованием фосфатных и полифосфатных комплексов.

Совокупность указанных процессов обусловливает связывание основной части редкоземельной составляющей, вследствие чего в твёрдой фазе концентрируется до 85 % редкоземельных элементов.

В фосфатном веществе Чилисайского месторождения – курските – присутствует также и ванадий, ионы которого в анионной форме (V^{5+} в виде ванадат-иона VO_4^{3-}) замещают фосфат-ион PO_4^{3-} в структуре карбонатапатита- благодаря схожести их ионных радиусов и зарядов. Именно поэтому он стабильно переходит в растворы и полупродукты при кислотной переработке фосфоритов. В глинистых и кремнистых минералах ионы ванадия в катионной форме (V^{3+} или V^{4+}) также замещают ионы алюминия Al^{3+} или железа Fe^{3+} в мусковите и в глинистых прослоях ванадиеносных сланцев. Вскрытие курскита $Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(VO_4)_xF_2$ с изоморфным замещением части ионов фосфора-групп на ионы ванадия можно записать в следующем виде:

$$Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(VO_4)_xF_2 + 10H_2SO_4 = (6-x)H_3PO_4 + 10CaSO_4 + xH_3VO_4 + 2HF.$$

При вскрытии этой кристаллической решетки серной кислотой ванадий переходит в раствор преимущественно в степени окисления +5. В условиях сильнокислой среды экстракционной фосфорной кислоты ($pH < 1$) орто-ванадатные формы свободного аниона VO_4^{3-} становятся термодинамически неустойчивыми и подвергаются последовательному протонированию с образованием диоксованадия VO_2^+.

В реальном растворе экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) этот катион связывается избытком ортофосфорной кислоты в растворимый комплекс. Полная схема превращения в растворе описывается уравнением:

$$VO_4^{3-} + 2H_2PO_4^- + 4H^+ = \left[VO_2\ (H_2PO_4)_2\right]^- + 2H_2O\ .$$

Именно образование стабильного дигидрофосфатного комплекса диоксованадия $\left[VO_2\ (H_3PO_4)_2\right]^-$ или аналогичных фосфорнованадиевых гетерополикомплексов удерживает ванадий в жидкой фазе и препятствует его осаждению.

Также в растворе может стабильно существовать растворимый гидросульфат диоксованадия, $\left[VO_2\ HSO_4\right]$ который образует в начале экстракции перешедший в сильнокислый раствор пятивалентный ванадий в присутствии избытка сульфат-ионов.

Малый ионный радиус ванадия, близкий к размеру иона фосфора, способствует тому, что он вместе с фосфором при сернокислотном вскрытии фосфоритов легко переходит в раствор, концентрируясь в ЭФК благодаря вышеописанным реакциям.

Заключение. Проведённые физико-химические исследования показали, что чилисайские фосфориты содержат примеси редких и редкоземельных элементов. Несмотря на относительно низкое их содержание в исходном сырье и продуктах переработки, значительные объёмы производства минеральных удобрений позволяют рассматривать данное сырьё как перспективный источник попутного получения РЗМ. Особый практический интерес представляет сравнительно высокое содержание наиболее ценных редкоземельных элементов иттриевой группы, что повышает экономическую эффективность и целесообразность их извлечения в процессе комплексной переработки фосфоритов.

Изучены процессы сернокислотного вскрытия чилисайского фосфатного сырья. Установлено, что степень перехода редкоземельных элементов в раствор составляет лишь 10–20 %. Наиболее вероятной причиной низкого извлечения является затруднённая диффузия ионов РЗЭ через образующийся слой фосфогипса. При этом более крупные ионы цериевой группы, близкие по размерам к иону кальция, легче вовлекаются в процессы изоморфного замещения в структуре фосфогипса молекулами фосфатов лантаноидов $LnPO_4$.

Ванадий, благодаря изоморфному замещению фосфат-иона в структуре франколита, при сернокислотном вскрытии практически полностью, совместно с фосфором, переходит в раствор и почти не соосаждается с фосфогипсом. Его высокая растворимость обусловлена образованием устойчивых фосфатных и сульфатных комплексов диоксованадия, что приводит к концентрированию ванадия в экстракционной фосфорной кислоте.

Таким образом, снижение степени извлечения редкоземельных элементов при вскрытии чилисайских фосфоритов обусловлено двумя основными механизмами: замедленной диффузией ионов через образующуюся корку сульфата кальция и их изоморфным включением в структуру фосфогипса.

Поступила: 25.06.2026; рецензирована: 09.07.2026; принята: 10.07.2026.

Литература

1. *Ma Y. et al*. Optimization and mechanism study of phosphorus and rare earth elements separation from phosphate ore by two-step leaching process // Minerals Engineering. 2026. Т. 239. С. 110–116.

2. *Xie S. et al*. A novel process for the separation and recovery of phosphorus and rare earth elements from associated rare earth phosphate ores // Separation and Purification Technology. 2024. Т. 340. С. 126687.
3. *Кенжалиев Б.К.* Извлечение редких и редкоземельных элементов из минерального и техногенного сырья / Б.К. Кенжалиев, Т.Ю. Суркова, Э.А. Пирматов [и др.]. Алматы, 2025. 358 с.
4. *Alemrajabi M. et al*. Recovery of rare earth elements from nitrophosphoric acid solutions // Hydrometallurgy. 2017. Т. 169. С. 253–262.
5. *Li Z. et al*. Simultaneous leaching of rare earth elements and phosphorus from a Chinese phosphate ore using H3PO4 // Green Processing And Synthesis. 2021. Т. 10. № 1. С. 258–267.
6. *Liang H. et al*. Rare-earth leaching from Florida phosphate rock in wet-process phosphoric acid production // Minerals & Metallurgical Processing. 2017. Т. 34. № 3. С. 146–153.
7. *Джанмулдаева Ж.К.* О модернизации сернокислотного разложения фосфоритов Каратау в производстве ЭФК / Ж.К. Джанмулдаева, А.К. Джанмулдаева, А.С. Муратов // Образование и наука. 2019. С. 358–366.
8. *Kaiynbaeva R.A. et al*. Study of the elemental and material composition of Karatau phosphorene's // Химический журнал Казахстана. 2025. № 1 (89). С. 78–87.
9. *Осипов П.А.* Разработка технологии извлечения редкоземельных металлов из техногенного сырья таразского завода минеральных удобрений (ТЗМУ) / П.А. Осипов, Ж.А. Алыбаев, Т.А. Мауль // Каталог инновационных проектов в области металлургии. Алматы: КазНТУ. 2006. С. 23.
10. *Бекенова Г.К.* Минералогическая история ванадия в углеродисто-кремнистых породах большого Каратау / Г.К. Бекенова, В.А. Глаголев // Известия НАН РК. Серия геологическая. 2006. № 3. С. 24–34.
11. *Sadiyeva K. R. et al*. Recovery of aluminum and vanadium compounds from Karatau phosphorites for application in the synthesis of aluminum-vanadium containing carbon nanoparticles // Egyptian Journal of Chemistry. 2022. Т. 65. № 131. С. 403–413.
12. *Dzhumankulova S.K. et al*. Review of state and prospects for development of vanadium production in the Kazakhstan Republic // Metallurgist. 2020. Т. 64. № 1. С. 75-81.
13. *Ескендирова М.М.* Азотно-сернокислотное разложение низкосортных фосфоритов Каратау / М.М. Ескендирова, М.З. Ескендиров, К.С. Жолдасбеков // Вестник науки Южного Казахстана. 2025. № 3. С. 47–53.
14. *Ёрбобоев Р.Ч.* Кинетика разложения фосфоритов Центральных Кызылкумов азотной кислотой / Р.Ч. Ёрбобоев, Х.Ч. Мирзакулов, Г.Э. Меликулова // Химическая технология и техника. 2020. С. 87–88.
15. *Allamuratova A.J. et al*. Combined technology for producing compound fertilizers from lowgrade phosphorites from central Kyzylkum // International Journal of advanced technology and natural sciences. 2021. Т. 2. № 2. С. 24–36.
16. *Pochitalkina I.A. et al*. Investigation of solid phase behavior during process of acidic decomposition of polpino phosphorite // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2017. Т. 60. № 10. С. 47–52.
17. *Qing J. et al*. Comprehensive recovery of rare earth elements and gypsum from phosphogypsum: A wastewater free process combining gravity separation and hydrometallurgy // Journal of Rare Earths. 2025. Т. 43. № 2. С. 362–370.
18. *Осипов П.А.* Экстракция суммы редкоземельных элементов синтетическими жирными кислотами / П.А. Осипов, Ж.А. Алыбаев, А.А. Землянский, В.С. Довбыш // КИМС. 2011. № 3. С. 50–55.
19. *Осипов П.А.* Осаждение фторидов редкоземельных элементов из солевой системы сернокислых растворов / П.А. Осипов, Ж.А. Алыбаев, А.А. Землянский, В.С. Довбыш // Труды международного форума «Наука и инженерное образование без границ». Алматы КазНТУ. 2009. Т. 1. С. 500–503.
20. *Локшин Э.П.* Растворимость YF3, CeF3, PrF3, NdF3 и DyF3 в растворах, содержащих серную и фосфорную кислоты / Э.П. Локшин, О.А. Тареева // Журнал неорганической химии. 2007. Т. 52. № 12. С. 1–5.
21. *Осипов П.А.* Растворимость хлоридов лантана, церия и неодима в водных и кислых растворах / П.А. Осипов, Ж.А. Алыбаев, Р.А. Шаяхметова // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 11. С. 129–133.