

Код МРНТИ 53.81.31

\*Т.К. Сарсембеков<sup>1</sup>, Т.А. Чепуштанова<sup>2</sup>, Е.С. Меркибаев<sup>3</sup>, Т. Янко<sup>4</sup><sup>1,2,3</sup>НАО «Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Республика Казахстан),<sup>3</sup>UNDERSLAB LTD OOD – Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная лаборатория по развитию и исследованиям» (г. Бургас, Республика Болгария)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЛЬМЕНИТОВОМ КОНЦЕНТРАТЕ САТПАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**Аннотация.** В статье представлены результаты минералогического исследования ильменитового концентрата, полученного из россыпей Сатпаевского месторождения Восточно-Казахстанской области. Работа направлена на изучение распределения редких и редкоземельных элементов – ниобия, циркония, скандия, лантана и церия – в структуре концентрата. Применены методы сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (SEM-EDS) и фазового моделирования в программной среде HSC Chemistry. Установлено, что элементы находятся как в виде изоморфных замещений в структуре ильменита, так и в форме микровключений в гемойльмените, гематите, псевдуртите и титаномagnetите. Полученные данные свидетельствуют о высокой перерабатываемости сырья и целесообразности его комплексного использования с извлечением стратегически важных компонентов.

**Ключевые слова:** ильменитовый концентрат, редкие элементы, редкоземельные элементы, Сатпаевское месторождение, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, ниобий, цирконий, минералогический состав, фазовый анализ.

### Сатпаев кен орнының (Шығыс Қазақстан облысы) ильменит концентратындағы сирек және сирек жер элементтерінің минералдануын зерттеу

**Аңдатпа.** Мақалада Шығыс Қазақстан облысындағы Сатпаев кен орнының шайынды кендерінен алынған ильменит концентратының минералогиялық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыс ниобий, цирконий, скандий, лантан және церий сияқты сирек және сирек жер элементтерінің концентрат құрылымындағы таралуын зерттеуге бағытталған. Зерттеуде сканирующей электрондық микроскопия мен энергия-дисперсиялық талдау (SEM-EDS), сондай-ақ HSC Chemistry бағдарламалық ортасындағы фазалық модельдеу әдістері қолданылды. Элементтердің ильменит құрылымындағы изоморфты орынбасулар түрінде де, гемойльменитте, гематитте, псевдуртите және титаномagnetитте микросынддылар түрінде де кездесетіні анықталды. Алынған деректер шикізаттың кешенді пайдалану және стратегиялық маңызды компоненттерді өндіру тұрғысынан жоғары өндеуге жарамдылығын көрсетеді.

**Түйінді сөздер:** ильменит концентраты, сирек элементтер, сирек жер элементтері, Сатпаев кен орны, сканирующей электрондық микроскопия, энергия-дисперсиялық талдау, ниобий, цирконий, минералогиялық құрам, фазалық талдау.

### Study of the mineralization of rare and rare-earth elements in ilmenite concentrate from the Satpayev deposit, East Kazakhstan Region

**Abstract.** The article presents the results of a mineralogical study of ilmenite concentrate obtained from the placers of the Satpayev deposit in the East Kazakhstan region. The research focuses on the distribution of rare and rare-earth elements – niobium, zirconium, scandium, lanthanum, and cerium – within the structure of the concentrate. Scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS) and phase modeling in the HSC Chemistry software environment were applied. It was found that the elements occur both as isomorphic substitutions within the ilmenite lattice and as micro-inclusions in hemoilmenite, hematite, pseudorutile, and titanomagnetite. The results demonstrate the high processability of the raw material and the feasibility of its comprehensive utilization with the extraction of strategically important components.

**Key words:** ilmenite concentrate, rare elements, rare-earth elements, Satpayev deposit, scanning electron microscopy, energy-dispersive analysis, niobium, zirconium, mineralogical composition, phase analysis.

### Введение

Одним из перспективных направлений развития отечественной титано-магниевого промышленности является комплексная переработка ильменитового концентрата, полученного из Сатпаевского месторождения Восточно-Казахстанской области. Сырьё отличается высоким содержанием титана и железа, а также присутствием редких и рассеянных элементов, включая ниобий, ванадий, цирконий и скандий [1]. Учитывая растущую потребность в стратегических металлах, научно обоснованное вовлечение подобных концентратов в переработку приобретает все большее значение.

Минералогический состав ильменита характеризуется высокой сложностью, обусловленной как первичными кристаллохимическими свойствами, так и вторичными трансформациями, происходящими под воздействием выветривания. Согласно литературным данным [2–10], в структуре ильменита возможны изоморфные замещения  $Ti^{4+}$  и  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  на элементы  $Mg$ ,  $Mn$ ,  $Al$ ,  $Cr$  и  $V$ , что изменяет его магнитные, электрические и флотационные характеристики. Кроме того, в ряде месторождений установлено присутствие включений гематита, гемойльменита,

титаномagnetита и псевдуртилов, что оказывает значительное влияние на схемы переработки и выбор реагентов.

Сатпаевское месторождение представляет собой аллювиальную россыпь, образовавшуюся за счет размыва коры выветривания титаносодержащих пород Караоткельской зоны. Рудные пески характеризуются высоким содержанием ильменита (до 90–97%) и представляют интерес как источник не только титана, но и попутно извлекаемых ценных компонентов. Проведенные ранее исследования [11] показали, что ильменит Сатпаевского месторождения содержит до 0,02%  $Nb_2O_5$  и обладает высокой радиоактивностью (1236 Бк/кг), что требует специального подхода к технологии переработки.

Несмотря на наличие отдельных исследований по физико-химическим характеристикам ильменитовых концентратов разных стран (Индия, Бразилия, Иран, Индонезия, Россия), публикации, касающиеся **конкретных форм нахождения и поведения ниобия** и других редких и редкоземельных элементов в структуре ильменита при переработке, особенно в образцах казахстанских месторождений, практически отсутствуют. Таким образом,

существует необходимость в проведении комплексного исследования по изучению минералогии и распределения редких элементов в ильменитовом концентрате Сатпаевского месторождения с применением современных аналитических методов.

**Целью** настоящей работы является изучение минерализации редких элементов, в первую очередь ниобия, в составе ильменитового концентрата с помощью сканирующей электронной микроскопии с ЭДС-анализом (SEM-EDS) с расчетом фазового состава исследованных микроучастков ильменитового концентрата в программе HSC Chemistry 6.0, модуль Mineralogy Iterations, а также оценка перспектив извлечения ценных компонентов в составе комплексной переработки титаносодержащего сырья.

### Методы

Объектом исследования является ильменитовый концентрат Сатпаевского месторождения Восточно-Казахстанской области. Исследование направлено на определение формы нахождения редких элементов, прежде всего ниобия, а также на выявление фазового состава компонентов концентрата.

Аналитические работы выполнялись с использованием электронно-зондового микроанализатора JXA-8230 (JEOL), оснащенного сканирующей электронной микроскопией (SEM) и энергодисперсионной спектроскопией (EDS). Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 25 пА – 5 нА и мертвом времени до 20%, что обеспечивает достоверную визуализацию и регистрацию структурных особенностей объектов в диапазоне от долей микрона до сотен микрон. Увеличение варьировалось от  $\times 40$  до  $\times 4000$ .

В качестве основного режима съемки использовался режим *обратно рассеянных электронов (COMPO)*, обеспечивающий повышенную контрастность участков с более высоким атомным номером. Дополнительно проводилась съемка в режиме *вторичных электронов (SEI)* для визуализации микроморфологии поверхности.

Всего было выполнено:

28 микрофотографий в различных режимах;

78 точечных микроанализов (EDS);

3 ЭДС-анализа по участкам;

9 ЭДС-картирования по элементам;

3 ВДС-картирования (волновая дисперсия);

2 ВДС-точечных анализа.

Дополнительно, свыше 300 точек были проанализированы в режиме недокументированного контроля для верификации микроструктурных аномалий.

Расчет *фазового состава* по результатам микроанализа выполнен с использованием программы HSC Chemistry 6.0 (модуль Mineralogy Iterations) по методике, изложенной в [12]. Для расчетов использованы полуколичественные данные, откорректированные по методике ZAF (автоматическая поправка на эффект атомного номера, поглощение и флюоресценцию).

### Результаты

В результате сканирующего электронно-микроскопического исследования ильменитового концентрата Сатпа-

евского месторождения, проведенного при увеличениях от  $\times 40$  до  $\times 4000$ , были получены серии микроснимков, демонстрирующих морфологию, форму, размеры и распределение частиц. В режиме вторичных и обратно рассеянных электронов визуализированы как плотные титаносодержащие зерна, так и вкрапления примесей.

Энергодисперсионный анализ (EDS) выявил наличие в исследуемых микроучастках элементов *O, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Fe, Zr* и *Nb*. По результатам картирования составов были выполнены расчеты фазового состава с использованием модуля *Mineralogy Iterations* программы HSC Chemistry 6.0.

### Пример 1: Микроучасток ильменитового концентрата

Расчет показал, что титан представлен в виде  $FeTiO_3$  и  $TiO_2$ , ниобий – в форме  $Nb_2O_5$ , цирконий – в форме  $ZrO_2$ , алюминий, магний, кальций, фосфор и скандий – в виде соответствующих оксидов (таблица 1). Присутствие фаз подтверждено как визуально, так и спектрометрически.

Таблица 1

Фазовый состав микроучастка ильменитового концентрата

Кесте 1

Ильменит концентратының микроучаскесінің фазалық құрамы

Table 1

Phase composition of the microarea of ilmenite concentrate

Фаза	Основной элемент	Содержание, % масс.
$FeTiO_3$	<i>Fe, Ti</i>	70.58
$TiO_2$	<i>Ti</i>	24.68
$Al_2O_3$	<i>Al</i>	2.26
$Sc_2O_3$	<i>Sc</i>	0.68
$Nb_2O_5$	<i>Nb</i>	0.06
$ZrO_2$	<i>Zr</i>	0.08
$SiO_2$	<i>Si</i>	0.73
$MgO, CaO, P_2O_5$	<i>Mg, Ca, P</i>	в следовых количествах

### Пример 2: Ильменитовая частица с оксидами Al, Mg, Si

В одном из анализируемых участков обнаружены примеси оксидов алюминия ( $Al_2O_3$ ), магния ( $MgO$ ) и кремния ( $SiO_2$ ), подтвержденные как по содержанию (таблица 2), так и по картированию (рис. 1). Основная фаза –  $FeTiO_3$  (98,02%).

### Пример 3: Включения редких и радиоактивных минералов

В отдельных микрообластях зафиксированы: частица *монацита* ( $CePO_4, LaPO_4, ThPO_4$ ), содержащая *Ce, La, Th* (таблица 3 и рис. 2); частица *циркона* ( $ZrSiO_4$ ) с примесью *Hf* и *Ti* (таблица 4 и рис. 3).



Таблица 4

Результаты расчета фазового состава частицы циркона

Кесте 4

Циркон бөлшегінің фазалық құрамын есептеу нәтижелері

Table 4

Results of phase composition calculation of the zircon particle

Zircon	Target	Amount	Content	Fe	Hf	O	Si	Ti	Zr
Species	Element	kg	wt-%	#wt-%	#wt-%	#wt-%	#wt-%	#wt-%	#wt-%
Target =>			100.01	0.63	1.38	38.72	12.85	1.08	45.35
Result =>		1000	100.00	1.31	1.43	34.46	14.52	1.12	47.15
ZrSiO <sub>4</sub>	Zr	948	94.75			33.08	14.52		47.15
FeTiO <sub>3</sub>	Ti	36	3.56	1.31		1.13		1.12	
HfO <sub>2</sub>	Hf	17	1.69		1.43	0.26			

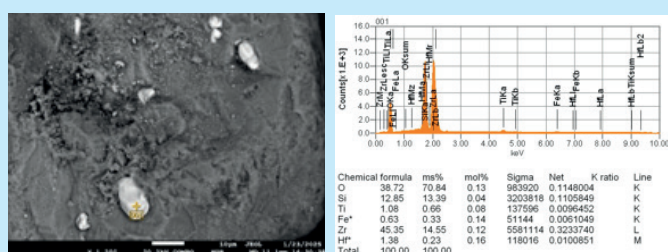


Рис. 3. Микроснимки частицы циркона с химическим составом.

Сурет 3. Циркон бөлшегінің микросуреттері және оның химиялық құрамы.

Figure 3. Micrographs of the zircon particle with its chemical composition.

## EDS и WDS-картирование

Проведено элементное картирование с распределением по следующим элементам:

EDS: O, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Fe, Zr, Nb (рис. 4);

WDS: O, Fe, Zr, Hf, Si (рис. 5).

Данные картирования подтверждают неоднородное распределение примесных и ценных компонентов, локализованных преимущественно в зонах межзерновых включений и вторичных фаз.

## Обсуждение результатов

В результате комплексного микронзондового анализа установлено, что ильменитовый концентрат Сатпаевского месторождения представляет собой сложную многокомпонентную систему, в которой редкие элементы распределены преимущественно в виде примесей в минеральной матрице. SEM-EDS анализ позволил идентифицировать основные минералы: ильменит ( $FeTiO_3$ ), гематит ( $Fe_2O_3$ ), титаномагнетит, псевдуртил и включения гемоильменита. При этом ниобий был зафиксирован в форме изоморфных включений в решетке ильменита, а также в виде микровключений вторичных минералов – предполагаемо феррониобатов и ниобатов титана.

Элементные карты распределения (EDS) показали, что ниобий и цирконий преимущественно локализуются

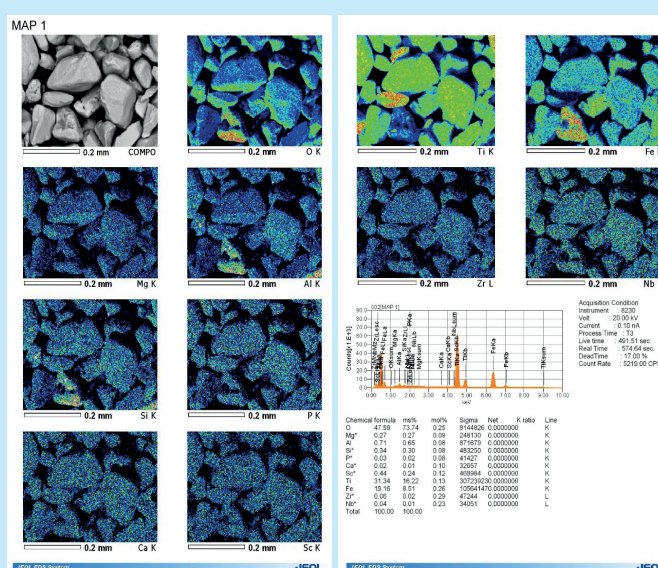
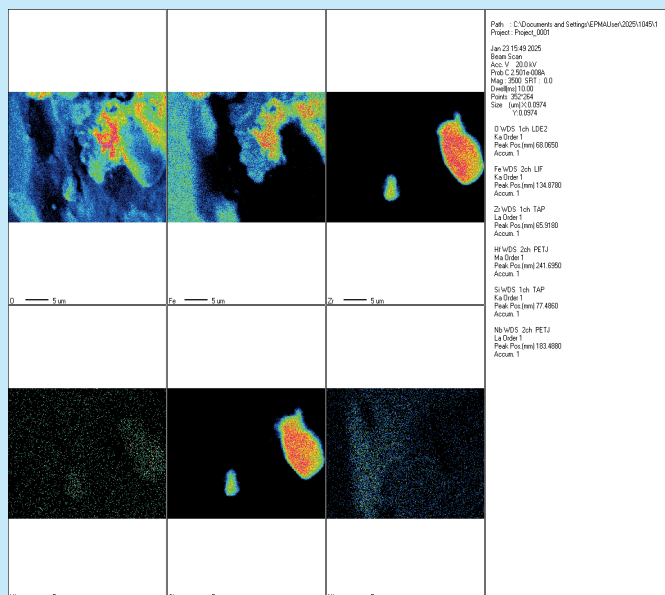


Рис. 4. EDS-картирование участка ильменитового концентрата по элементам O, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Fe, Zr и Nb с химическим составом данного микроучастка.

Сурет 4. Ильменит концентраты учаскесінің O, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Fe, Zr және Nb элементтері бойынша EDS-картографиясы және осы микроучаскесінің химиялық құрамы.

Figure 4. EDS mapping of the ilmenite concentrate area for elements O, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Fe, Zr, and Nb with the chemical composition of the microarea.

в зонах, ассоциированных с обогащенными фрагментами железа и титана, в то время как скандий и другие РЗЭ (лантан, церий) встречаются в виде рассеянных примесей и микровключений, часто неидентифицируемых в рамках стандартной кристаллохимии ильменита. Предположительно, данные элементы могут находиться в адсорбированном состоянии на поверхности мелкодисперсных минеральных фаз либо входить в состав тонкодисперсных фаз типа монацита и алланаита, характерных для россыпей корового происхождения.



**Рис. 5. WDS-картирование микроучастка ильменитового концентрата по элементам O, Fe, Zr, Hf, Si, Zr.**

**Сурет 5. Ильменит концентраты микроучасткесінін O, Fe, Zr, Hf және Si элементтері бойынша WDS-картографиясы.**

**Figure 5. WDS mapping of the ilmenite concentrate microarea for elements O, Fe, Zr, Hf, and Si.**

Наличие редкоземельных элементов подтверждает важность более детального минералого-геохимического анализа, поскольку они потенциально могут быть выделены как попутная ценная составляющая при переработке. Однако неравномерное распределение и отсутствие устойчивых кристаллических фаз затрудняет их селективное извлечение традиционными методами.

Дополнительным ограничивающим фактором является высокая радиоактивность ильменитового концентрата (до 1236 Бк/кг), связанная с присутствием природных изотопов тория и урана. Их содержание коррелирует с фракционным составом и степенью выветривания исходной руды, а также может быть связано с сорбцией на поверхности микрофаз, содержащих РЗЭ.

Сравнение с зарубежными аналогами (Индия, Бразилия, Иран, Россия) показывает, что ильменит Сатпаевского месторождения уступает по содержанию редких элементов, но его чрезвычайно высокое содержание основного компонента (до 97% ильменита), наличие редких и редкоземельных элементов и благоприятные геолого-технические условия залегания делают его перспективным объектом для комплексной переработки.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки технологии с предварительным фракционированием и выделением зон, обогащенных ниобием и РЗЭ, с последующим фазоселективным извлечением на основе хлорирования, кислотного выщелачивания или ионообменной сепарации. Оптимизация условий может быть достигнута путем термодинамического моделирования поведения элементов с учетом фазовой принадлежности и взаимодействия в системе  $Ti-Fe-Nb-Zr-Sc-REE-O-Cl$ .

**Заключение**

В ходе настоящего исследования проведен комплексный анализ минерального и химического состава ильменитового концентрата, полученного из россыпей Сатпаевского месторождения Восточно-Казахстанской области. С применением методов сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (SEM-EDS) и фазового моделирования в программной среде HSC Chemistry установлено, что основным минералом является ильменит с примесью гемоильменита, гематита, титаномагнетита и псевдуритов.

Выявлено, что ниобий, цирконий, скандий, а также отдельные редкоземельные элементы (лантан, церий) присутствуют в структуре концентрата в форме изоморфных замещений и микровключений. Наиболее значимым является распределение ниобия, локализованного преимущественно в зонах обогащения железом и титаном, что подтверждает перспективность его попутного извлечения при переработке. Кроме того, повышенное содержание естественных радионуклидов требует разработки специализированных методов дезактивации и безопасной утилизации отходов.

Полученные данные могут быть использованы для разработки эффективных технологических схем комплексной переработки ильменитового концентрата с вовлечением редких и редкоземельных компонентов. Научная новизна работы заключается в установлении особенностей распределения стратегических элементов в малоизученных казахстанских россыпях и в обосновании необходимости применения фазово-селективных методов извлечения. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение поведения выявленных элементов на стадиях хлорирования, кислотного выщелачивания и гидromеталлургической селекции.

**Благодарность**

*Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP22686490).*

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Сарсембеков Т.К., Чепуштанова Т.А. Распределение ниобия и ванадия в промпродуктах при производстве тетрахлорида титана // Цветные металлы. 2022. № 8 (956). С. 55–60 (на русском языке)
2. Эльснер Х. Тяжелые минералы экономической важности: Ганновер: BGR, 2010. 218 с. (на английском языке)

3. Памплон Г., Гомес К.К. Потенциал ильменита в качестве солнечного поглотителя // Журнал теплотехнической инженерии. 2020. Т. 19. № 2. С. 59 (на английском языке)
4. Минералогический анализ и процесс извлечения из ильменитовых пород / Сукмара С. [и др.] // Журнал исследований и технологий материалов. 2022. Т. 17. С. 3384–3393 (на английском языке)
5. Химический и минералогический состав ильменита / Мехдило А. [и др.] // Журнал минералогической инженерии. 2015. Т. 70. С. 64–76 (на английском языке)
6. Рао Д.С., Сенгупта Д. Электронно-микроскопические исследования ильменита // Журнал спектроскопии. 2014. С. 8 (на английском языке)
7. Новоселов К.Л., Гаврилова К.А. Типоморфные особенности акцессорного ильменита // MATEC Web of Conferences. 2016. Т. 48. С. 4 (на английском языке)
8. Исследования происхождения ильменита / Рао П.Г. [и др.] // Журнал Геологического общества Индии. 2019. Т. 93. С. 101–108 (на английском языке)
9. Ильменит как индикатор алмазоносности / Кармоди Л. [и др.] // Экономическая геология. 2014. Т. 109. С. 775–783 (на английском языке)
10. Состав ильменита как индикатор условий формирования промышленно-алмазоносных и безрудных кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции / А.В. Каргин [и др.] // Петрология. 2020. № 4. С. 341–369 (на русском языке)
11. Разделение и характеристика минеральных компонентов / Контрерас М. [и др.] // Международный журнал теплотехники и экологии. 2018. Т. 16. № 2. С. 105–112 (на английском языке)
12. Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л. Расчет и оптимизация технологий с использованием HSC Chemistry: учебное пособие: М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 212 с. (на русском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Сарсембеков Т.К., Чепуштанова Т.А. Тетрахлорид титанын өндіру кезіндегі өндірістік өнімдерде ниобий мен ванадийдің таралуы // Түсті металдар. 2022. № 8 (956). Б. 55–60 (орыс тілінде)
2. Эльснер Х. Экономикалық маңызды ауыр минералдар: Ганновер: BGR, 2010. 218 б. (ағылшын тілінде)
3. Памплон Г., Гомес К.К. Ильменитті күн сәулесін сіңіргіш ретінде қолдану мүмкіндігі // Жылу инженериясы журналы. 2020. Т. 19. № 2. Б. 59 (ағылшын тілінде)
4. Ильменитті жыныстардың минералдық құрамы және оларды бөлу процесі / Сукмара С. [және т. б.] // Материалдарды зерттеу және технологиялар журналы. 2022. Т. 17. Б. 3384–3393 (ағылшын тілінде)
5. Ильмениттің химиялық және минералогиялық құрамы / Мехдило А. [және т. б.] // Минералдық инженерия журналы. 2015. Т. 70. Б. 64–76 (ағылшын тілінде)
6. Рао Д.С., Сенгупта Д. Ильменитті электрондық микроскоппен зерттеу // Спектроскопия журналы. 2014. Б. 8 (ағылшын тілінде)
7. Новоселов К.Л., Гаврилова К.А. Ілесіе ильмениттің типоморфтық белгілері // MATEC Web of Conferences. 2016. Т. 48. Б. 4 (ағылшын тілінде)
8. Ильмениттің пайда болуын зерттеу / Рао П.Г. [және т. б.] // Үндістан геологиялық қоғамының журналы. 2019. Т. 93. Б. 101–108 (ағылшын тілінде)
9. Алмас индикаторы ретінде ильменит / Кармоди Л. [және т. б.] // Экономикалық геология. 2014. Т. 109. Б. 775–783 (ағылшын тілінде)
10. Архангельск алмаз губерниясының өнеркәсіптік алмасты және бедеу кимберлиттердің қалыптасу жағдайларының көрсеткіші ретінде ильменит құрамы / А.В. Каргин [және т.б.] // Петрология. 2020. № 4. Б. 341–369 (орыс тілінде)
11. Минералдарды бөлу және сипаттау / Контрерас М. [және т. б.] // Жылу және қоршаған орта инженериясы жөніндегі халықаралық журнал. 2018. Т. 16. № 2. Б. 105–112 (ағылшын тілінде)
12. Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л. HSC Chemistry көмегімен технологияларды есептеу және оңтайландыру: оқу құралы: М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 212 б. (орыс тілінде)

#### REFERENCES

1. Sarsembekov T.K., Chepushtanova T.A. Raspredelenie niobiya i vanadiya v promproduktakh pri proizvodstve tetrakhlorida titana [Distribution of niobium and vanadium in by-products during titanium tetrachloride production], Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals]. 2022. No. 8 (956). 55–60 pp. (in Russian)
2. Elsner H. Heavy Minerals of Economic Importance: Hannover: BGR, 2010. 218 p. (in English)

3. Pamplona G., Gomes K.C. Potential of ilmenite as a solar absorber // *Journal of Thermal Engineering*. 2020. V. 19. No. 2. 59 p. (in English)
4. Mineral analysis and extraction process of ilmenite rocks / Sukmara S. [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. V. 17. 3384–3393 pp. (in English)
5. Chemical and mineralogical composition of ilmenite / Mehdilo A. [et al.] // *Minerals Engineering*. 2015. V. 70. 64–76 pp. (in English)
6. Rao D.S., Sengupta D. Electron microscopic studies of ilmenite // *Journal of Spectroscopy*. 2014. 8 p. (in English)
7. Novoselov K.L., Gavrilova K.A. Typomorphic features of accessory ilmenite // *MATEC Web of Conferences*. 2016. V. 48. 4 p. (in English)
8. Provenance studies of ilmenite / Rao P.G. [et al.] // *Journal of the Geological Society of India*. 2019. V. 93. 101–108 pp. (in English)
9. Ilmenite as a diamond indicator mineral / Carmody L. [et al.] // *Economic Geology*. 2014. V. 109. 775–783 pp. (in English)
10. Sostav il'menita kak indikator uslovii formirovaniya promyshlenno-almazonosnykh i bezrudnykh kimberlitov Arkhangel'skoi almazonosnoi provintsii [Composition of ilmenite as an indicator of the conditions of formation of industrial diamond-bearing and barren kimberlites of the Arkhangelsk diamond province], A.V. Kargin [et al.], *Petrologiya [Petrology]*. 2020. No. 4. 341–369 pp. (in Russian)
11. Mineral separation and characterization / Contreras M. [et al.] // *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*. 2018. V. 16. No. 2. 105–112 pp. (in English)
12. Maltsev G.I., Timofeev K.L. Raschet i optimizatsiya tekhnologii s ispol'zovaniem HSC Chemistry: uchebnoe posobie [Calculation and optimization of technologies using HSC Chemistry: textbook]. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. 212 p. (in Russian)

**Сведения об авторах:**

**Сарсембеков Т.К.**, MBA, ст. преподаватель, кафедра МиОПИ, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [t.sarsembekov@satbayev.university](mailto:t.sarsembekov@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0001-9454-6335>

**Чепуштанова Т.А.**, Ph.D, к.т.н., ассоц. профессор, кафедра МиОПИ, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [t.chepushtanova@satbayev.university](mailto:t.chepushtanova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-6526-0044>

**Меркибаев Е.С.**, Ph.D, старший преподаватель, кафедра МиОПИ, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [e.merkibayev@satbayev.university](mailto:e.merkibayev@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>

**Янко Т.**, Ph.D, главный научный директор UNDERSLAB LTD OOD (г. Бургас, Болгария), [titanlab3@ukr.net](mailto:titanlab3@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0003-2217-4290>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

**Сарсембеков Т.К.**, MBA, аға оқытушы, МиОПИ кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Чепуштанова Т.А.**, Ph.D, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, МиОПИ кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Меркибаев Е.С.**, Ph.D, аға оқытушы, МиОПИ кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Янко Т.**, Ph.D, UNDERSLAB LTD OOD бас ғылыми директоры (Бургас қ., Болгария)

**Information about the authors:**

**Sarsembekov T.K.**, MBA, Senior Lecturer, Department of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Chepushtanova T.A.**, Ph.D, Associate Professor, Department of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Merkibayev E.S.**, Ph.D, Senior Lecturer, Department of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Yanko T.**, Ph.D, Chief Scientific Officer, UNDERSLAB LTD OOD (Burgas, Bulgaria)