Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки

Василий Николаевич БУЗМАКОВ*,
Юлия Васильевна ВОЛОДИНА**

АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», Качканар, Свердловская область, Россия

Аннотация

Цель работы: изучение возможностей повышения извлечения пятиокиси ванадия и снижения двуокиси титана в концентрат на АО «ЕВРАЗ КГОК». Однако пятиокись ванадия и двуокись титана тесно взаимосвязаны из-за сложного минерального состава руд, который, в свою очередь, обусловлен генезисом месторождения. Как следствие, снижение доли титана вызывает снижение доли ванадия.

Актуальность. ЕВРАЗ КГОК разрабатывает Качканарскую группу месторождений титаномагнетитовых железных руд, содержащих примеси ванадия, которые позволяют выплавлять высокопрочные легированные сорта стали. Примеси титана отрицательно сказываются на последующем доменном переделе и увеличивают себестоимость процесса плавки.

Методика работ. Для определения извлечения пятиокиси ванадия в концентрат был использован магнитный анализ на трубке Дэвиса, ситовый анализ тонины помола и статистическая обработка полученных данных.

Результаты. Оработка месторождения ведется по четырем рудным телам, имеющим различный минерально-петрографический состав и, соответственно, различный результат обогащения. При обогатительном переделе часть ванадия теряется в хвостах обогащения. Для обеспечения планового содержания ванадия в концентрате соотношение «доля пятиокиси ванадия/доля железа в исходной руде» должно быть не ниже 0,0077 (в каждом пакете).

Выводы. Для обеспечения доли ванадия в продуктах переработки концентрата необходимо управлять процессом отгрузки руд за счет информации о доле ванадия, которая может быть извлечена. Контроль необходимо вести по показателю «соотношение доли ванадия и доли железа в исходной руде». Корректирующие действия проводить путем изменения доли руды, отгружаемой с различных рудных тел.

Ключевые слова: титаномагнетит, ванадий, титан, генезис, добыча руды, обогащение, отходы, отбор проб, магнитная фракция, менеджмент.

Введение

АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» добывает и обогащает магнитной сепарацией (МС) бедную малотитанистую ванадийсодержащую железную (титаномагнетитовую) руду Гусевогорского месторождения. Оработка ведется карьерами по соответствующим рудным телам – Главному, Северному, Западному и Южному.

Минеральный состав руд довольно разнообразен. Рудные минералы включают магнетит четырех генераций, ильменит двух генераций, титаномагнетит, ульвошпинель и шпинель состава герцинит–плеонаст; нерудные – моноклинный (диаллаг) и ромбический пироксены, плагиоклазы. Вторичные минералы в руде представлены серпентином, амфиболом, цоизитом, эпидотом и хлоритом. Вмещающими породами являются диаллаговые, оливиновые и плагиоклазовые пироксениты, амфиболиты, верлиты и габбро. Ильменит и шпинелиды образуют как отдельные зерна (до 1 мм), связанные с титаномагнетитом, так и вроски в магнетите и титаномагнетите в виде тонких (до 0,05 × 0,01 мм) пластин

(структуры распада твердых растворов), что затрудняет обогащение [1].

Схема обогащения титаномагнетитовой руды на комбинате включает сухую магнитную сепарацию (СМС), три стадии измельчения и мокрую магнитную сепарацию (ММС) после каждой стадии измельчения. В результате получается концентрат, содержащий 60–62 % железа, 2,5–2,6 % двуокиси титана и до 0,5 % пятиокиси ванадия [2] и в низких количествах (менее 0,1 %) вредные примеси. Далее концентрат смешивается с бентонитовой глиной и используется для производства железорудного сырья (ЖРС) для доменной плавки – окатышей. При доменном и последующем конверторном переделах получают сталь, обогащенную ванадием, и ванадиевый шлак, из которого в дальнейшем извлекают ванадий [3]. Цена последнего на мировом рынке растет, и потому его извлечение представляет большой интерес [4], а изучение распределения ванадия в рудах, концентратах и продуктах их переработки представляется

*Buzvn@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1156-957X>

**ainoai@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6841-7783>

Рис. 1. Зависимость доли ванадия в концентрате от соотношения доли V_2O_5 и доли Fe в исходной руде.

Figure 1. Dependence of the proportion of vanadium in the concentrate on the ratio of the proportion of V_2O_5 and the proportion of Fe in the original ore.

весьма актуальными. Однако в агломерат и окатыши также попадает титан, являющийся вредной примесью в металлургии [5].

Ванадий в рудах Гусевогорского месторождения

Ванадий и титан связаны друг с другом как в оксидах (магнетит, ильменит, шпинелиды), так и в силикатах. Причиной данной взаимосвязи является вещественный состав руды. В небольших количествах ванадий входит в состав магнетита и титаномагнетита. По данным В. М. Гольдшмидта, ванадий является составной частью кристаллической решетки магнетита, изоморфно замещая трехвалентное железо. По данным Л. Ф. Борисенко и др. [6], ванадий присутствует в титаномагнетите в составе шпинели (плеонаст с 30 % герцининовой молекулы), возможно, в виде кульсонита. Также ванадий содержится в породообразующих минералах группы пироксена, амфибола, эпидота и хлорита, хотя и в меньшем количестве. Титан в руде и концентрате связан с титаномагнетитом, с ильменитом и с ульвошпинелью. Корреляционная связь, существующая между TiO_2 и V_2O_5 , объясняется как ассоциацией между ильменитом и ванадиевой шпинелью (кульсонитом), так и наличием ванадия в ульвошпинели [7]. При больших увеличениях под микроскопом в шлифах наблюдается образование оторочек шпинели вокруг игольчатых выделений ильменита структуры распада твердых растворов в титаномагнетите.

Данные связи объясняются условиями формирования рудных тел месторождения. В конце кристаллизации дунитовой магмы железо изоморфно замещает магний в силикатах (вследствие близких значений ионных радиусов) с образованием пироксенитов. При этом в остаточных растворах происходит накопление ванадия и титана, что увеличивает кислотность флюида и способствует образованию молекул шпинели, при перекристаллизации

смешивающихся с титаномагнетитом. Вероятно, в этих условиях образовались шпинелиды с высоким содержанием ванадия, где ионы трехвалентного алюминия замещаются ионами трехвалентного ванадия. Можно предположить, что кроме изоморфной примеси ванадия в титаномагнетите существует и примесь ванадия в шпинели. В силикатах тем временем происходило окисление железа и его замещение ионами ванадия [8]. При амфиболитизации пироксенов, связанной с внедрением габбровых интрузий, происходит перекристаллизация титаномагнетита с укрупнением зерен магнетита, выделением зерен ильменита [9]. При этом происходит перераспределение ванадия, который частично уходит в амфиболы, замещая в них Fe^{3+} . Как следствие этого, амфиболитовые разности руд отличаются повышенной долей ванадия и его повышенными потерями при обогащении руд. При фельдшпатизации, также связанной с внедрением габбро, происходит привнос натрия и алюминия, вынос магния и железа с оставлением ванадия, который замещает Al^{3+} , что приводит к обогащению руд ванадием. Такие разности также отличаются повышенной долей ванадия в исходной руде, но пониженными потерями при обогащении руд.

Управление качеством продукции

Поведение ванадия при обогатительном переделе и влияние состава руды на этот процесс представляет большой практический интерес, так как ванадий из концентрата, практически весь переходит в окатыши. При этом потери ванадия происходят только в процессе обогатительного передела [10]. Поскольку изучение его распределения в продуктах производится в пределах действующего предприятия с отработанной технологией обогащения, основное внимание уделяется возможности управления качеством добываемой руды. Оценку качества добываемой руды предлагается проводить не только по доле

пятиокиси ванадия в исходной руде, как производится в настоящее время, но и по возможности ее извлечения в концентрат.

Для этого необходимо учесть то, что зависимость доли ванадия в концентрате от распределения доли железа в исходной руде слабая. Как следствие, необходимо ввести показатель, не требующий большого количества дополнительных анализов, но достаточно информативный. По мнению авторов, таким показателем в исходной руде может быть соотношение доли пятиокиси ванадия и доли железа. Данные доли определяются при эксплуатационной разведке и имеются при оперативном планировании и управлении, необходимы только небольшие пересчеты. Для проверки данного предположения был проведен сравнительный анализ зависимости пятиокиси ванадия в концентрате на окатыши от соотношения «доля пятиокиси ванадия/доля железа в исходной руде». Результаты представлены на рис. 1.

По результатам анализа были сделаны следующие выводы:

1. Зависимость этих показателей прямая и сильная, т. е. с ростом соотношения «доля пятиокиси ванадия/доля железа в исходной руде» наблюдается рост доли пятиокиси ванадия в концентрате на окатыш;

2. Для того чтобы не допустить сорт Б в окатышах (доля пятиокиси ванадия в окатышах менее 0,53 %), соотношение «доля пятиокиси ванадия/доля железа» в исходной руде в каждом пакете (с вероятностью 85 %) должна быть не ниже 0,0072;

3. Для повышения вероятности не менее 95 % (с учетом достоверности анализа 0,07 % абс.) соотношение «доля пятиокиси ванадия/доля железа» в исходной руде должно быть не ниже 0,0077 (в каждом пакете).

Для оперативного контроля над процессами горно-обогатительного комплекса данный показатель достаточно информативен, но в то же время при управлении необходимо решать задачу корректировки процесса в случае, если показатели не будут соответствовать запланированным.

Для решения этого вопроса была разработана оценка возможного выхода ванадия в магнетитовый концентрат при обогатительном переделе Качканарского горно-обогатительного комбината.

Для оценки использовались пробы, отбираемые из шлама, образующегося при бурении взрывных скважин (шламовые пробы), которые отбираются геологической

службой комбината по сети 25×25 м для оценки технологических свойств добываемой руды.

По данным пробам проводится магнитный анализ с помощью трубки Дэвиса, который позволяет выделить магнитную и немагнитную фракции при измельчении пробы до 85 % класса $-0,071$ мм. Магнитная фракция анализируется на содержание железа, двуокиси титана и пятиокиси ванадия.

Данные анализы проводятся на протяжении нескольких лет. По всем четырем рудным телам за последние два с половиной года был проведен статистический анализ по долям железа и пятиокиси ванадия в магнитной фракции, а также их извлечение. Результаты приведены в табл. 1.

Такие доли железа и пятиокиси ванадия в магнитной фракции и их извлечение объясняются минеральным составом руды. На Северном рудном теле преобладают мелкозернистые диаллаговые пироксениты [11], поэтому при обогащении наблюдается максимальное извлечение при низкой доле пятиокиси ванадия в исходной руде и магнитной фракции. В Западном рудном теле преобладают плагиоклазовые (фельдшпатизированные) и амфиболитизированные пироксениты, а на Главном и Южном рудных телах диаллаговые и амфиболитизированные пироксениты имеют примерно равное соотношение, но при этом на Южном рудном теле они тонкозернистые, что и дает более низкую долю железа в магнитной фракции.

Таким образом, в случае неподтверждения доли пятиокиси ванадия в концентрате необходимо снизить долю руды, отгружаемой с Северного рудного тела, но увеличивать ее не с Южного (хотя там и высокий ванадий в руде), а с Западного.

Увеличение доли элементов при росте тонины помола

Помимо этого проверялась гипотеза увеличения доли железа, двуокиси титана и пятиокиси ванадия в магнитной фракции при увеличении тонины помола. Данное предположение основывалось на том, что при измельчении часть зерен ильменита уйдет в хвосты [12]. Проба измельчалась до разной крупности и подвергалась магнитному анализу на трубке Дэвиса. Результаты представлены в табл. 2.

Изменение доли железа в магнитной фракции и выход магнитной фракции связаны с тем, что сначала происходит отделение мелких зерен магнетита и их очистка от силикатов, но при измельчении ниже 95 % класса

Таблица 1. Распределение железа и ванадия по рудным телам Гусевогорского месторождения.

Table 1. Distribution of iron and vanadium against ore bodies of the Gusevogorsk deposit.

Рудное тело	Исходная руда			Магнитная фракция		Извлечение	
	Fe _{общ} , %	V ₂ O ₅ , %	Выход, %	Fe _{общ} , %	V ₂ O ₅ , %	Fe _{общ} , %	V ₂ O ₅ , %
Главное	15,24	0,130	15,96	62,59	0,551	65,5	67,6
Западное	15,78	0,139	16,71	62,29	0,641	66,0	77,1
Северное	15,15	0,109	16,87	63,22	0,535	70,4	82,8
Южное	16,42	0,138	16,82	59,73	0,565	61,2	68,9

Таблица 2. Влияние тонины помола на показатели обогащения.
Table 2. Influence of the fineness of grinding on the enrichment indicators.

Массовая доля в питании магнитного анализа, %				Магнитная фракция				Немагнитная фракция			
				Выход, %	Массовая доля, %			Выход, %	Массовая доля, %		
Класс –0,071 мм, %	Fe _{общ}	V ₂ O ₅	TiO ₂		Fe _{общ}	V ₂ O ₅	TiO ₂		Fe _{общ}	V ₂ O ₅	TiO ₂
85,0	15,32	0,127	1,23	16,0	63,8	0,605	2,63	84,0	6,09	0,036	0,96
85,0	15,32	0,127	1,23	16,4	63,9	0,610	2,65	83,6	5,76	0,032	0,95
87,6	15,32	0,127	1,23	16,2	64,7	0,610	2,65	83,2	5,76	0,034	0,95
87,6	15,32	0,127	1,23	15,8	63,9	0,600	2,62	84,2	6,22	0,038	0,97
89,0	15,32	0,127	1,23	15,8	64,6	0,600	2,61	84,6	6,09	0,038	0,97
89,0	15,32	0,127	1,23	16,0	64,7	0,600	2,61	94,0	5,91	0,037	0,97
90,5	15,32	0,127	1,23	15,6	64,8	0,600	2,59	94,4	6,20	0,040	0,98
90,5	15,32	0,127	1,23	15,4	64,6	0,600	2,60	94,6	6,39	0,041	0,99
92,0	15,32	0,127	1,23	15,6	64,9	0,600	2,59	84,4	6,19	0,040	0,98
92,0	15,32	0,127	1,23	15,6	64,3	0,590	2,59	84,4	6,30	0,042	0,98
95,0	15,32	0,127	1,23	16,0	63,7	0,595	2,55	84,0	6,10	0,038	0,98
95,0	15,32	0,127	1,23	16,2	63,6	0,590	2,48	83,8	5,97	0,037	0,99
97,5	15,32	0,127	1,23	16,4	63,7	0,585	2,53	83,6	5,80	0,037	0,97
97,5	15,32	0,127	1,23	16,2	63,6	0,590	2,57	83,8	5,97	0,037	0,97
100,0	15,32	0,127	1,23	16,2	63,8	0,585	2,52	83,8	5,93	0,038	0,98
100,0	15,32	0,127	1,23	16,4	63,7	0,580	2,54	83,6	5,80	0,038	0,97

–0,071 мм происходит ошламовывание концентрата и он загрязняется тонкими сrostками магнетита с силикатами [13]. Постепенное снижение доли пятиокси ванадия и двуокси титана в магнитной фракции и их извлечение с увеличением тонины помола связано с тем, что происходит очистка магнетита от зерен ильменита и шпинелидов.

В целом при определении направления организации работ по увеличению извлечения ванадия следует в первую очередь руководствоваться составом руды, а не изменением технологии обогащения, так как хотя и существуют новые технологии измельчения руд [14], но та часть ванадия, которая входит в состав немагнитной фракции (силикаты, ильменит, шпинелиды), все равно уйдет в хвосты магнитного обогащения [15]. Как следствие, увеличение тонины помола не даст нужного результата.

Выводы

1. Оперативный контроль, обеспечивающий нужные содержания пятиокси ванадия в концентрате, можно вести с использованием показателя «Отношение доли пятиокси ванадия к доле железа в исходной руде».

2. Для обеспечения планового содержания V₂O₅ в концентрате необходимо регулировать долю поступающих на обогатительный передел руд различных рудных тел по его доле в магнитной фракции, а не по его доле в руде. При снижении доли пятиокси ванадия в концентрате необходимо увеличивать отгрузку с Западного рудного тела.

3. При увеличении тонины помола можно снизить содержание двуокси титана, но при этом снизится доля пятиокси ванадия в ЖРС, т. е. потери ванадия возрастут, и снизится доля железа в концентрате. Таким образом, увеличивать тонкость помола концентрата с целью извлечения дополнительного объема ванадия нецелесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bystrov I. G., Pirogov B. I., Yakushina O. A. Morphostructural and Constitutional Features of Titanomagnetite in Iron Ore of the Pudozhgorsky Deposit // *Geology of Ore Deposits*. 2015. Vol. 57, issue 6. P. 496–521.
2. Макушев С. Ю., Канаев И. В., Черепанов Д. В. Дробильно-обогатительная фабрика ОАО «ЕВРАЗ КГОК» // *Горный журнал*. 2013. № 9/1. С. 13–16.
3. Yi-min Zhang, Li-na Wang, De-sheng Chen, Wei-jing Wang, Ya-hui Liu, Hong-xin Zhao, Tao Qi. A method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium-bearing titanomagnetite // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2018. Vol. 25. № 2. P. 131–144. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1556-0>
4. A Deep Value Vanadium Play You Need To Know About // *Palisade Research*. 2018. May 28.
5. Дмитриев А. Н., Витькина Г. Ю., Петухов Р. В., Петрова С. А., Чесноков Ю. А. Оценка показателей доменной плавки титаномagnetитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75, № 2. С. 154–165. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-2-154-165>
6. Борисенко Л. Ф., Делицын Л. М., Полубабкин Е. А., Усков Е. Д. Комплексное использование титаномagnetитовых руд. М.: Геоинформмарк, 1997. 65 с.

7. Бузмаков В. Н., Володина Ю. В. Влияния массовой доли ильменита в руде Гусевгорского месторождения на качество производимого концентрата // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII МНТК, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2018. С. 174–177.
8. Фоминых В. Г., Краева В. П., Ларина Н. В. Петрология и рудогенезис Качканарского массива. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 84 с.
9. Иванов О. К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала (минералогия, петрология, генезис). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1997. 488 с.
10. Бузмаков В. Н. Влияние минерального состава руд на качество обогащения Качканарского ГОКа // Труды междунар. науч.-техн. конф. (19–20 мая). СПб.: НМСУ «Горный», 2015. С. 39–40.
11. Кантемиров В. Д., Яковлев А. М., Титов Р. С., Козлова М. В. Предварительная оценка технологических типов титаномагнетитовых руд // Обогащение руд. 2018. № 3. С. 56–60. <https://doi.org/10.17580/or.2018.03.10>
13. Пелевин А.Е., Сытых Н.А. Эффективность раскрытия породных минералов в стадиях измельчения титаномагнетитовой руды // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII МНТК, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2018. С. 17–21.
14. Ballantyne G., Powell M. S., Radziszewski P. Extension of the comminution energy curves and application to stirred milling performance // Canadian Mineral Processors Conference. Ottawa, Ontario, Canada. 2016. January.
15. Сытых Н.А., Бузмаков В. Н., Володина Ю. В. Извлечение пятиокиси ванадия из руд Гусевгорского месторождения на АО «ЕВРАЗ КГОК» // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXV МНТК, проводимой в рамках XVIII Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2020. С. 165–169.

Статья поступила в редакцию 15 июня 2020 года

Estimation of influence of the mineral composition of ore bodies of titanomagnetites of the Gusevogorskoye deposit on the concentration of vanadium in the products of their processing

Vasiliy Nikolaevich BUZMAKOV^{*}
Yuliya Vasil'evna VOLODINA^{**}

JSC "EVRAZ KGOK", Kachkanar, Sverdlovsk region, Russia

Abstract

Purpose of the work: to study the possibilities of increasing the extraction of vanadium pentoxide and reducing titanium dioxide into concentrate at EVRAZ KGOK. However, vanadium pentoxide and titanium dioxide are closely interconnected due to the complex mineral composition of the ores, which, in turn, is due to the genesis of the deposit. As a consequence, a decrease in the titanium content causes a decrease in the vanadium content.

Relevance. EVRAZ KGOK develops the Kachkanar group of titanomagnetite iron ore deposits containing vanadium impurities, which make it possible to smelt high-strength alloyed steels. Impurities of titanium negatively affect the subsequent blast-furnace conversion and increase the cost of the smelting process.

Methodology. To determine the extraction of vanadium pentoxide into the concentrate, magnetic analysis on a Davis tube, sieve analysis of the fineness of grind and statistical processing of the data were used.

Results. The deposit is being developed in four ore bodies with different mineral and petrographic composition and, accordingly, different enrichment results. During the concentration conversion, part of the vanadium is lost in the tailings of enrichment. To ensure the planned content of vanadium in the concentrate, the ratio "proportion of vanadium pentoxide / proportion of iron in the original ore" should be at least 0.0077 (in each batch).

Conclusions. To ensure the proportion of vanadium in the products of concentrate processing, it is necessary to control the process of shipping ores using information on the proportion of vanadium that can be recovered. Control should be carried out according to the indicator "the ratio of the proportion of vanadium and the proportion of iron in the original ore." Corrective actions should be taken by changing the proportion of ore shipped from various ore bodies.

Keywords: titanomagnetite, vanadium, titanium, genesis, ore mining, enrichment, waste, sampling, magnetic fraction, management.

REFERENCES

1. Bystrov I. G., Pirogov B. I., Yakushina O. A. 2015, Morphostructural and Constitutional Features of Titanomagnetite in Iron Ore of the Pudozhgorsky Deposit. *Geology of Ore Deposits*, vol. 57, issue 6, pp. 496–521.
2. Makushev S. Yu., Kanaev I. V., Cherepanov D. V. 2013, EVRAZ KGOK crushing and concentration plant. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], no. 9/1, pp. 13–16. (In Russ.)
3. Yi-min Zhang, Li-na Wang, De-sheng Chen, Wei-jing Wang, Ya-hui Liu, Hong-xin Zhao, Tao Qi. 2018, A method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium-bearing titanomagnetite. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 131–144. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1556-0>
4. 2018, A Deep Value Vanadium Play You Need To Know About. *Palisade Research*, May 28.
5. Dmitriev A. N., Vitkina G. Yu., Petukhov R. V., Petrova S. A., Chesnokov Yu. A. 2019, Estimation of indicators of blast furnace smelting of titanomagnetite concentrates with different titanium dioxide content. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], vol. 75, no. 2, pp. 154–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-2-154-165>
6. Borisenko L. F., Delitsyn L. M. Polubabkin E. A., Uskov E. D. 1997, *Kompleksnoye ispol'zovaniye titanomagnetitovykh rud* [Complex use of titanomagnetite ores]. Moscow, 65 p.
7. Buzmakov V. N., Volodina Yu. V. 2018, *Vliyaniya massovoy doli il'menita v rude Gusevogorskogo mestorozhdeniya na kachestvo proizvodimo-go kontsentrata* [Influence of the mass fraction of ilmenite in the ore of the Gusevogorskoye deposit on the quality of the produced concentrate]. Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXIII MNTK carried out within the framework of the XVI Ural mining decade. Ekaterinburg, pp. 174–177.
8. Fominykh V. G., Kraeva, V. P., Larina N. V. 1987, *Petrologiya i rudogenezis Kachkanarskogo massiva* [Petrology and ore genesis of the Kachkanar massif]. Sverdlovsk, 84 p.
9. Ivanov O. K. 1997, *Kontsentrisheski-zonal'nyye piroksenit-dunitovyye massivy Urala (mineralogiya, petrologiya, genesis)* [Concentric-zoned pyroxenite-dunitite massifs of the Urals (mineralogy, petrology, genesis)]. Ekaterinburg, 488 p.
10. Buzmakov V. N. 2015, *Vliyaniye mineral'nogo sostava rud na kachestvo obogashcheniya Kachkanarskogo GOKa* [Influence of the mineral composition of ores on the quality of concentration of the Kachkanarsky GOK]. Proceedings of the international scientific and technical conference (May 19–20). Saint Petersburg, pp. 39–40.

✉Buzvn@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1156-957X>

^{**}ainoai@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6841-7783>

11. Kantemirov V. D., Yakovlev A. M., Titov R. S., Kozlova M. V. 2018, Preliminary assessment of technological types of titanomagnetite ores. *Obogashchenie rud* [Mineral processing Journal], no. 3, pp. 56–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2018.03.10>
12. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. 2017, Estimation of influence of the mineral composition of titanomagnetite ore on the results of magnetic enrichment. *Obogashcheniye rud* [Mineral processing Journal], no. 4, pp. 36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2017.04.07>
13. Pelevin A. E., Sytykh N. A. 2018, *Effektivnost' raskrytiya porodnykh mineralov v stadiyakh izmel'cheniya titanomagnetitovoy rudy* [Effectiveness of the release of rock minerals in the stages of grinding titanomagnetite ore]. Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXIII MNTK, carried out in the framework of the XVI Ural mining decade. Ekaterinburg, pp. 17–21.
14. Ballantyne G., Powell M. S., Radziszewski P. 2016, Extension of the comminution energy curves and application to stirred milling performance. Canadian Mineral Processors Conference. Ottawa, Ontario, Canada, January.
15. Sytykh N. A., Buzmakov V. N., Volodina Yu. V. 2020, *Izvlecheniye pyatiokisi vanadiya iz rud Gusevogorskogo mestorozhdeniya na AO «YEVRAZ KGOK»* [Release of vanadium pentoxide from ores of the Gusevogorsk deposit at EVRAZ KGOK]. Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXV MNTK carried out within the framework of the XVIII Ural mining decade. Ekaterinburg, pp. 165–169.

The article was received on June 15, 2020