

УДК 553.3

В.Н. Бузмаков, Ю.В. Володина
АО ЕВРАЗ КГОК, г. Качканар

ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНАЯ СЫРЬЕВАЯ БАЗА МЕТАЛЛУРГИИ УРАЛА (НА ОСНОВЕ ОПЫТА РАЗРАБОТКИ КАЧКАНАРСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ)

В связи с истощением запасов магнетитовых руд, рентабельных для отработки, роль титаномагнетитовых руд возрастает. Кроме того, наличие в рудах V_2O_5 значительно повышает их ценность, из-за чего месторождения используются только для добычи ванадия, в то время как титан и ванадий уходят в хвосты обогащения или в отходы металлургического производства. В случае, если титан нельзя удалить в должной мере, то руды не разрабатываются. Однако для успешного применения современных технологий обработки руд этих месторождений необходимо учитывать ряд минералогических и генетических факторов, и как следствие, проводить технологические исследования на ранних этапах геологического изучения рудных объектов. Еще в процессе оценки месторождения необходимо рассматривать не только технологии обогащения, но и металлургического передела, а также проводить геолого-технологическое картирование, которое позволит эффективно управлять качеством продуктов на всех переделах производственного процесса.

Ключевые слова: титаномагнетит, Качканар, титан, ванадий, железо.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2022.27

Титаномагнетитовые руды – это руды, основным полезным компонентом которых является титаномагнетит. Титаномагнетит (а. titanomagnetite) по определению Горной энциклопедии [1], имеет два значения: 1) минерал подкласса сложных оксидов, магнетит титаносодержащий $(Fe,Ti)Fe_2O_4$; 2) магнетит с включениями шпинелей (герцинита, плеонаста, кульсонита, ганита и др.), ульвошпинели, ильменита в виде пластинчатых вростков (продукт распада твёрдых растворов). Генетически они приурочены к расслоенным интрузиям, анортзитовым массивам, зонам тектономагматической активизации древних платформ, срединным массивам, зонам спрединга и субдукции складчатых областей [2]. Происхождение этих руд предполагается из пород верхней мантии, внедрившихся в земную кору [3]. Данный тип месторождений характеризуется очень большими запасами, простым строением рудного тела, наличием ванадия, возможностью открытой разработки и проведением

недорогого магнитного обогащения. К недостаткам относится наличие оксида титана, который не удаляется при механическом обогащении и неблагоприятно влияет на доменный передел [4].

В связи с истощением запасов магнетитовых руд, рентабельных для отработки, роль титаномагнетитовых руд будет возрастать, особенно в промышленно развитых районах (Урал, Северо-Запад России, Сибирь). Кроме того, титаномагнетитовые месторождения в некоторых случаях могут быть использованы для попутного извлечения других черных, цветных и редких металлов (ванадий, хром, алюминий, медь, скандий, галлий и т.д.) [5, 6].

Возраст руд от архея до антропогена. К докембрийским рудам относятся в основном руды древних платформ. Сюда входят формации расслоенных интрузий (габбровая и габбро-амфиболитовая формации), анортозитовых массивов и зон тектономагматической активизации (щелочно-ультраосновная формация с интрузивами центрального типа и формация расслоенных интрузивов основных и ультраосновных пород бушвельдского типа).

Палеозойские и мезо-кайнозойские месторождения, как правило, связаны со складчатыми областями и представляют собой массивы ультраосновных-основных пород. С геодинамической точки зрения такие массивы представляют собой рифтогенные образования или срединно-океанических хребтов зон спрединга. Они представлены габброидной (габбро-диорит-диабазовой габбро-амфиболитовой и др.) высокотитанистой формацией. Либо островодужные образования или образования активной континентальной окраины эпохи субдукции, представленные низкотитанистой дунит-пироксенит-габбровой формацией качканарского типа. Надо учесть, что на современном срезе основная часть этих массивов прошла коллизионный этап развития района, что привело к изменению их формы и минерально-петрографического состава. По особенностям внутреннего строения все массивы делятся на два основных типа - концентрически-зональные и линейно-блоковые [7, 8].

К кайнозойским относятся современные прибрежно-морские россыпи титаномагнетитов (черные пески). Наиболее крупные запасы известны в Японии, Новой Зеландии, Филиппинах, Египте, на Дальнем Востоке РФ. Доля титаномагнетита в россыпях составляет от 7% до 35%.

Надо сказать, что несмотря на попытки отдельных авторов провести полную классификацию месторождений титаномагнетитов, из-за их достаточно малой изученности, их полной генетической классификации до сих пор не существует. В частности, недостаточно разработана их геодинамическая позиция. По этой же причине не полностью разработана их промышленная классификация.

Использование титаномагнетитовых руд для производства железа началось давно. Аристотель в IV веке до н.э. писал, что халибы использовали для производства стали морской песок с северного побережья Анатолии. Он состоял из смеси зёрен магнетита, титаномагнетита и содержал ванадий. В следствие этого получаемая сталь была легированной, и обладала высокими качествами.

Разработка отдельных участков титаномагнетитовых месторождений в России началась с развитием горной промышленности в XVIII веке на Урале, а также в отдельных районах Карелии. Разрабатывались сплошные руды в оливинитах, без обогащения, или с ручной рудоразборкой, с высоким выходом шлака. Но наличие дешевого сырья и рабочей силы обеспечивало рентабельность производства. Использовались руды месторождений Вознесенского (Кыглымская группа) и Магнитная Яма на северном склоне г. Качканар, Билимбаевское и горы Магнитки. И все же к началу XX века их разработка не выдержала конкуренции с доменным процессом и прекратилась.

Первые научные исследования титаномагнетитовых руд начались в России на Урале, с развитием горного дела. В 1770 году П.С. Паллас совершил путешествие по Уралу, где изучал в том числе и титаномагнетитовые руды. Изучение начиналось на массиве горы Соловьевой (Н. Тагил), горы Качканар и Кыглымского интрузивного комплекса. В 1868-90 годах А.П. Карпинский провел первые петрографические исследования вмещающих пород и руд [9].

Следующий этап изучения этих месторождений связан с потребностью в новых месторождениях железа и возникновением потребности в ванадии и титане. В 1931-1932 гг. исследования титаномагнетитовых месторождений Урала производились сотрудниками Уральского отделения Института прикладной минералогии и геологии Академии наук СССР И.И. Малышевым, П.Г. Пантелеевым и А.В. Пэком, которые впервые в истории изучения этих руд дали общую оценку перспектив рудоносности Качканарского массива и подобных групп [10]. Ими в 1928 - 31 годах была проведена разведка и подготовлены к эксплуатации Кусинское ильменит-титаномагнетитовое и Первоуральское титаномагнетитовое месторождения. В 1963 году началась разработка Гусевоторского месторождения Качканарским ГОКом, с последующим окучкованием и металлургическим переделом на Нижнетагильском металлургическом комбинате. За рубежом разработка титаномагнетитовых месторождений началась так же в связи с потребностью в пигментном оксиде титана и ванадии.

В целом наличие пятиоксида ванадия значительно повышает ценность месторождений титаномагнетитовых руд [11, 12]. Вследствие чего, некоторые титаномагнетитовые месторождения (с долей ванадия в рудах более 1%),

могут использоваться только как ванадиевые, а железо и титан могут быть хвостами обогащения. По гидрометаллургической технологии руду (иногда после магнитного обогащения) смешивают с химическими реагентами (содой, известью и т.д.), спекают, а затем водой извлекают растворимые ванадаты. Из шлаков может извлекаться железо и титан или шлаки могут уходить в отвалы. Такая технология применяется в ЮАР и Финляндии. На некоторых месторождениях Канады, после извлечения ванадия твердый титансодержащий остаток обрабатывают соляной кислотой при высокой температуре. После фильтрации, промывки и сушки получают продукт, содержащий от 76% до 83% TiO_2 .

Традиционная коксодоменная технология применяется компанией ЕВРАЗ. Но её реализация экономически эффективна только при высокой производительности (не менее 3 млн т/год). Кроме того, при содержании в железорудном сырье (ЖРС) двуокиси титана более 4% применение данной технологии затруднительно, т.к. происходит взаимодействие доменного шлака с коксом, которое ведет к интенсивному восстановлению и карбидизации титана. Из-за чего горн доменной печи загромождается тугоплавкими карбидами и оксикарбонитридами титана, что снижает фильтруемость и приводит к ухудшению течения жидких фаз (капель чугуна и шлака). При этом возрастает расход кокса, уменьшается производительность доменных печей, растет трудоемкость работ на горне и существенно увеличиваются затраты на очистку (обработку) чугуновозных ковшей из-за их зарастания тугоплавкими титансодержащими шлаками [13].

Поэтому при разработке титаномагнетитовых месторождений для доменного передела большое значение имеет технология обогащения [14]. В частности, применение тонкого грохочения и другие приемы [15]. Если не удастся разработать технологическую схему обогатительного передела, экономически позволяющую в должной мере удалять титан из концентрата, месторождение не разрабатывается [16].

Несмотря на то, что ванадий является ценным компонентом, его запасы подсчитываются в пределах контуров кондиционных железных руд. Опыт работы Качканарского ГОКа говорит о том, что потери ванадия происходят в основном при обогатительном переделе. Вследствие высокой ценности ванадия, для снижения его потерь, еще на этапе разведки и при разработке проекта ГОКа необходимы технологические исследования, позволяющие оценить поведение ванадия при обогатительном переделе и влияние состава руды на этот процесс. Это представляет большой практический интерес, так как ванадий из концентрата, практически весь переходит в ЖРС [17]. Кроме того, при проведении данных исследований необходимо оценить отделение ильменита и выход титана в концентрат [18]. Как правило, данные

исследования проводятся на «трубке Дэвиса», при различной крупности рудных зерен. При этом, как минимум единичные пробы, а желательно все рудные, следует подвергнуть технологическим исследованиям, для оценки перспектив использования месторождения еще на стадии оценки. Кроме того, на этой же стадии, еще при определении текстурных и структурных особенностей руды выделить возможность проведения сухой сепарации после дробления. Исходя из того, что равномерная вкрапленность не позволяет проводить сухую сепарацию или снижает её качество.

Для руд с тонкозернистой структурой и руд со структурами распада твердых растворов выделение ильменитовых концентратов затруднено. Попытки улучшить структуру руд, такие как окислительный обжиг для улучшения методов обогащения пока практических результатов не дают [19].

Соответственно для таких руд коксоподобная технология не подходит. Разрабатываются новые технологии прямого восстановления железа (Direct Reduced Iron) с помощью природного газа или водорода, рудо-угольных окатышей [20]. Так как получается большое количество шлака, сложно отделяемого от металла. Более подходящей является технологии «ITmk3» или «RCI», при которых происходит концентрирование ванадия и титана в шлаковой фазе и отделение чугуна от шлака, при которых шлак может не плавиться. То есть карбидизация титана в шлаке не имеет большого значения. Но при этом для получения титана и ванадия необходимо разрабатывать технологии рентабельного их извлечения из шлака. А при содовой технологии это возможно только при низкой доле кварца [21]. Таким образом, содовая и хлорная технологии извлечения ванадия и титана экономически возможна только тогда, когда в концентрате почти чистые титаномагнетит и ильменит, даже в тесных сростках. А для переработки шлаков с кварцем нужны другие технологии, например, фтор-аммонийная [22]. То есть выбор технологии обогащения зависит от технологии металлургического передела.

Подводя итоги, можно определить задачи, стоящие перед наукой в свете разработки месторождений титаномагнетитов, которые являются основной перспективной базой металлургических предприятий Урала. Это разработка генетической и промышленной классификации руд. Необходимость проводить технологические исследования на ранних этапах геологического изучения рудных объектов. Еще в процессе оценки месторождения необходимо рассматривать не только технологии обогащения, но и металлургического передела, а также проводить геолого-технологическое картирование, которое позволит эффективно управлять качеством продуктов на всех переделах производственного процесса.

Библиографический список

1. Горная энциклопедия. М. «Советская энциклопедия» 1984—1991 годов. Т. 1-5
2. *Иванов О. К.* Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала: (Минералогия, петрология, генезис). - Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 1997. - 488 с.
3. *Хаин Е.В., Ремизов Д.Н.* Шесть типов ультрабазит-базитовых комплексов в складчатых сооружениях или проблема существования астеносферных окон под континентальными окраинами, испытавшими обдукцию офиолитов. //Материалы третьей международной конференции «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения». Екатеринбург. Издательство ИГГ УрО РАН. 2009г. Ст.237-242.
4. *Темников В.В., Калимулина Е.Г., Тлеуглабулов Б.С.* Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК». //Черные металлы №7 (1039) 2018 г., С. 32-37.
5. *Борисенко Л.Ф., Делицин Л.М., Подубабкин В.А., Усков В.Д.* Комплексное использование титаномагнетитовых руд. М. 1997. 65 с.
6. *Володина Ю.В.* Галлий в рудах Качканара и перспективы его использования. // НАУКА-ОБРАЗОВАНИЕ-ПРОИЗВОДСТВО: опыт и перспективы развития: материалы XIV Международной научно-технической конференции (8-9 февраля 2018 г): в 2 томах. Т.1 – Н. Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. С. 48-51.
7. *Готтман И.А., Пушкарев Е.В.* Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габро-ультрамафитовых комплексах Урало-Аляскинского типа. Литосфера. 2009;(2):78-86/
8. *Волченко Ю.А., Иванов К.С., Коротеев В.А., Оже Т.* Структурно-вещественная эволюция комплексов платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Часть I //Литосфера. 2007. №3. Ст. 3-27.
9. *Карпинский А.П.* Авгитовые породы д. Мулдакаево и горы Качканар. //Горный журнал 1896, т 2, №5, ст. 54-78.
10. *Мальшев И.И., Пантелеев П.Г., Пэк А.В.* Титаномагнетитовые месторождения Урала. Л. АН СССР. 1934, 264 с.
11. *Bystrov I. G., Pirogov V. 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.
12. *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>
13. *Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Петухов Р.В., Петрова С.А., Чесноков Ю.А.* Оценка показателей доменной плавки титаномагнетитовых 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>
14. *Горбатова Е.А.* Определение возможности разделения титаномагнетитов и ильменита при селективной сепарации титаномагнетитовых руд. /Е.А. Горбатова, Б.И. Пирогов, М.С. Колкова, О.С. Колесатова. //Известия Уральского Государственного горного университета. – 2020. – вып.1. – С. 90-97
15. *Markauskas D., Kruggel-Emden H.* Coupled DEM-SPH simulations of wed continuous spreng // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30, Iss. 12. P. 2997 – 3009.
16. *Булатов К.В., Газалеева Г.И., Мушкетов А.А., Сопина Н.А.* Разработка технологии получения железного концентрата из медно-титаномагнетитовых руд

- Волковского месторождения. // Обогащение руд №5 2021 г. С. 27-32.
17. *Бузмаков В.Н., Володина Ю.В.* Оценка влияния минерального состава руд Гусевогорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки АО ЕВРАЗ КГОК. // Известия УГГУ 2020, выпуск 3 (50), стр. 62-68. <https://doi.org/10.214402307-2091-2020-3-62-68>.
18. *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>
19. *Колкова М.С.* Твердофазные превращения минералов в процессе окислительного обжига титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения. /М.С. Колкова, Е.А. Горбатова, Б.И. Пирогов, А.С. Иоспа. Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020): Материалы российской конференции с международным участием. Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. 2020 – С. 279-280.
20. *Тлеуглабулов С.М.* Состояние и развитие металлургии железа и стали. //НАУКА-ОБРАЗОВАНИЕ-ПРОИЗВОДСТВО: опыт и перспективы развития: материалы XIV Международной научно-технической конференции (8-9 февраля 2018 г): в 2 томах. Т.1 – Н. Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. С 19-24.
21. *Горбунова А.В., Мукаев Е.Г., Чурилов А.Е.* Техногенные ванадийсодержащие отходы и возможность их утилизации. //Молодой ученый. 2017. №11 (145). С. 54-56.
22. *Дмитриев А.Н., Смороков А.А., Кантаев А.С., Никитин Д.С., Витькина Г.Ю.* Фтораммонийный способ переработки титановых шлаков // Известия вузов. Черная металлургия. 2021 Том 64 № 3 С. 178–183. DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-178-183

TITANIUM-MAGNETITE DEPOSITS AS A PROMISING RAW MATERIAL BASE FOR METALLURGY IN THE URALS (BASED ON THE EXPERIENCE OF DEVELOPING THE KACHKANAR GROUP OF DEPOSITS).

V.N. Buzmakov, Y.V. Volodina

buzvn@mail.ru

Since the depletion of reserves of magnetite ores, profitable for mining, the role of titanomagnetite ores increases. In addition, the presence of V₂O₅ in the ores significantly increases their value, which is why the deposits are used only for the extraction of vanadium, and titanium and vanadium go to the waste of metallurgical production. If the titanium cannot be removed to the proper extent, then the ores are not mined. However, for the successful application of modern technologies for processing the ores of these deposits, it is necessary to take into account a number of mineralogical and genetic factors, and as a result, to conduct technological research at the early stages of geological study of ore objects. Even in the process of assessing a deposit, it is necessary to consider not only the enrichment technologies, but also the metallurgical processing, as well as to carry out geological and technological mapping, which will effectively manage the quality of products at all stages of the production process.

Keywords: titanomagnetite, Kachkanar, titanium, vanadium, iron.