

ISSN 0235-5574

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД**

ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Москва 1997

Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Полубабкин В.А., Усков Е.Д. Комплексное использование титаномагнетитовых руд. — М., 1997. — 65 с.: ил. — (Лаб. и технол. исслед. минер. сырья). Обзор / ЗАО "Геоинформмарк". — Библиогр.: с. 60-65 (65 назв.).

Рассмотрены перспективы расширения комплексного использования титаномагнетитовых руд РФ, относящихся к различным промышленно-генетическим типам. Приведены данные об их ресурсах и добыче. Показана важная роль ванадия при переделе титаномагнетитовых концентратов. Дана характеристика руд титаномагнетитовых месторождений в отношении титана, скандия, металлов платиновой группы, золота и др. Рассмотрены способы получения ванадия, титана, скандия и возможность использования титаномагнетитового концентрата в качестве утяжелителя при бурении.

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Закрытое акционерное общество "Геоинформмарк"

**ЛАБОРАТОРНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

*Обзорная информация
Выпуск 2*

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ТИТАНОМАГNETИТОВЫХ РУД**

Издается с 1969 г.

Москва 1997

Выходит 4 раза в год

РГАСНТИ 52.31.51
УДК 622.765:553.494

Л.Ф.Борисенко (ИМГРЭ),
Л.М.Делицын (НИЦ "Экология" ОИВТ РАН),
В.А.Полубабкин (ООО "Бентонит Урала"),
Е.Д.Усков (Качканарский ГОК)

Введение

Титаномагнетитовые руды во многих странах мира пользуются довольно широким распространением (РФ, ЮАР, Танзания, Норвегия, Швеция, США и др.). Как правило, они приурочены к мафит-ультрамафитовым комплексам магматических пород. Известны также довольно значительные по масштабам россыпи титаномагнетита (РФ, Новая Зеландия, Япония, Филиппины, Индонезия, Египет и др.). На коренных месторождениях чаще встречаются бедные вкрапленные титаномагнетитовые (14-20% Fe), реже — сплошные (богатые) руды (40-60% Fe). Главным рудным минералом и в тех и в других рудах является титаномагнетит. Кроме того, в ограниченном количестве в этих же рудах встречаются обособленные зерна ильменита (иногда халькопирита, борнита), которые в некоторых случаях могут быть выде-

лены в самостоятельный концентрат [9]. Это же относится и к апатиту.

Запасы титаномагнетитовых руд коренных месторождений значительны и могут достигать нескольких миллиардов тонн. За рубежом наиболее крупные месторождения этого типа приурочены к Бушвельдскому комплексу (ЮАР). Они интенсивно эксплуатируются на протяжении длительного времени с целью получения ванадия и железа. По производству ванадийсодержащих продуктов ЮАР занимает первое место в мире [62,64]. В России резервы этих руд также весьма внушительны (Урал, Сибирь, Дальний Восток, Карелия, Кольский п-ов). Крупные месторождения титаномагнетита давно известны на Урале (Гусевогорское, Качканарское и др.). С 1963 г. на базе Гусевогорского месторождения работает крупнейший в Европе Качканарский ГОК. Объемы ежегодной добычи руды на Гусевогорском месторождении за последние десять лет составляют 32-45 млн т. Максимальное количество произведенного в год (1989 и 1990 гг.) концентрата достигало 8,2 млн т [17]. Получаемый титаномагнетитовый концентрат главным образом используется для получения агломерата и окатышей, из которых на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК) и Чусовском металлургическом заводе (ЧМЗ) производят ванадиевую продукцию и железо. Объединение "Ванадий-Тулачермет" производит оксид ванадия и феррованадий. Максимальное количество ванадия, содержащегося в ванадистом шлаке, полученном на металлургических предприятиях РФ, достигало 14 тыс.т в год [56]. Извлекаемый на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа титаномагнетитовый концентрат является главным сырьем для ванадия в РФ и странах СНГ [5]. Помимо металлургического передела часть титаномагнетитового концентрата в последнее время используется в качестве утяжелителя при бурении скважин. Это принципиально новое использование продукции Качканарского ГОКа [16]. По своим основным показателям титаномагнетитовый концентрат вполне может заменить используемый при буровых работах барит.

Ждет своей очереди расширение областей использования хвостов, которые составляют основную долю добытой руды (около 80%). В настоящее время количество хвостов, накопленных в хвостохранилище Качканарского ГОКа, превышает 650 млн т [17]. Лишь их незначительная часть используется для изготовления стройматериалов. Таким образом, к настоящему времени

уровень использования титаномагнетитовых руд качканарского типа довольно ограничен. Согласно ориентировочным расчетам из добытых руд в товарную продукцию извлекается около 20% полезных компонентов [17]. Поэтому увеличение степени использования добытых титаномагнетитовых руд является настоящей современной потребностью. Не вызывает сомнения, что в будущем существенное значение постепенно будут приобретать отходы обогащения, из которых возможно получение скандия, титана, металлов платиновой группы, золота [9,17]. Из продуктов и отходов металлургического производства помимо ванадия возможно получение титана, марганца [4], хрома [39]. Не исключено извлечение алюминия и галлия [4]. Другими словами, использование бедных титаномагнетитовых руд качканарского типа, содержащих в среднем 15,8% железа и 0,1% ванадия, действительно нуждается в повышении комплексности их использования. Помимо расширения готовой продукции комплексное использование отходов обогащения позволит улучшить экологическую обстановку в районе их добычи и передела. Повышение комплексного использования добытых руд в целом имеет чрезвычайно важное геолого-экономическое значение [22] и может в будущем без существенных дополнительных затрат заметно повысить эффект использования полезных ископаемых.

Несмотря на то, что титаномагнетитовые руды давно используются в качестве сырья для получения чугуна, стали и сплавов ванадия, технология их переработки продолжает непрерывно развиваться. Это связано с совершенствованием конструкции печных агрегатов, подготовкой шихты, особенностями плавления титаномагнетитов, сопровождающееся образованием тугоплавких титановых шлаков, с вопросами повышения степени извлечения ванадия, которая остается все еще недостаточно высокой, а также проблемой увеличения комплексности использования сырья. Переработка титаномагнетитов является крупнотоннажным производством и влечет за собой помимо чисто технологических задач массу проблем, связанных с экологией, загрязнением окружающей среды, отторжением земель для складирования хвостов обогащения, созданием накопителей для хранения ванадиевых шламов и др. Соответственно продолжается поиск новых решений по переработке руд, концентратов и минералов титаномагнетитовых месторождений с целью наиболее рационального использования всех компонентов сырья [1,11-13,19,20 и др.].

ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД

Месторождения титаномagnetитовых руд имеют преимущественно магматическое происхождение, пространственно и генетически связаны с ультрамафитами и мафитами в основном нормального ряда. Рудоносные ультраосновные и основные породы встречаются в различных магматических формациях. В геосинклинальных областях они установлены: в дунит-пироксенит-габбровой формации (Гусевогорское, Качканарское, Вознесенское, Конжаковское, Волковское, Первоуральское, Висимское) и пироксенит-габбровой (Лысанское, Кедранское); в габбро-диорит-диабазовой (Копанское, Медведевское, Маткальское, Юрбыш-кинское, Верхне-Ийское, Мало-Тагульское и др.); в базальт-сиенит-пироксенитовой (Суроямское); в габбро-сиенитовой (Гремяха-Вырмес, Еletz-Озеро, Культайга, Харловское, Кизирское и др.).

На древних щитах и платформах магматогенные месторождения титаномagnetита главным образом приурочены: к формации габбро-диабазов (Пудожгорское, Койкарское); к габбро-анортозитовой формации (Большой Сейим, Кручининское, Цагинское, Геранское, Гаюмское, Маймаканское, Богидэ и др.); к формации расслоенных габброидов (Чинейское и др.); к щелочно-ультраосновной формации (Африканда, Вуори-Ярви и др.) (табл. 1). Около половины титаномagnetитовых месторождений РФ находится в пределах геосинклинальных областей, а другая половина — в пределах древних платформ [39].

Наиболее крупные интрузии, несущие титаномagnetитовое оруденение, находятся в габбро-анортозитовой формации. Например, общая площадь Джугджурского плутона около 11 тыс. км². Однако оруденелые участки составляют лишь незначительную часть плутона; их размеры обычно до 400x2000 м. Значительную площадь могут занимать массивы расслоенных габброидов — для Чинейского плутона около 100 км². Это же относится к мафит-ультрамафитовым массивам дунит-пироксенит-габбровой формации Урала (десятки квадратных километров). Однако собственно рудоносные участки, сложенные преимущественно пироксенитами или габбро, как правило, не превышают площади в несколько квадратных километров. Так, на Гусевогорском титаномagnetитовом месторождении общая площадь рудного поля составляет 5,2 км².

Интрузии, к которым приурочены месторождения титаномагнетита, обычно связаны с образованием глубинных разломов на древних платформах, в обрамлении докембрийских щитов и платформ; в геосинклинальных областях — участки ранних этапов развития последних. Большое разнообразие в составе изверженных пород и в геологическом строении массивов, к которым приурочены магматические месторождения титаномагнетита, тесно связано со специфическими особенностями тектонического развития различных участков земной коры, что влияло как на фракционное выплавление вещества, так и на дифференциацию базальтового расплава и порядок кристаллизации минералов. Так, титаномагнетит Гусевгорского, Качканарского и подавляющего большинства месторождений в габбро, перидотитах и пироксенитах выделялся после силикатов (фузивный тип), а титаномагнетит рудных габбро-диабазов Пудожгорского и Койкарского месторождений (Карелия) удалялся из расплава одним из первых — сегрегационный тип.

Характерно, что титаномагнетитовое оруденение обычно не выходит за пределы ультраосновных и основных пород, чем подтверждается тесная генетическая его связь с материнскими породами магматического происхождения (Соколов Г.А., 1967; Борисенко Л.Ф., 1973, 1983; [39, 51] и др.). Для руд фузивного типа характерна типичная сидеронитовая структура, при которой рудные минералы заполняют промежутки между более идиоморфными зернами силикатов.

Обычно массивы ультрамафитов и мафитов имеют расслоенный характер, хотя и не везде четко выраженный. Например, Чинейский массив имеет асимметричную форму лополита и относится к типу расслоенных габброидных плутонов. В разрезе чередуются слои габбро-норитов, габбро, лейкогаббро, анортозитов, рудных габбро-норитов и сплошных руд [29]. Менее четко выражена расслоенность ультрамафитов дунит-пироксенит-габбровой формации Урала (Решитько В.А., 1961; Воробьева О.А. и др., 1962).

Интрузии, с которыми пространственно и генетически связаны магматогенные месторождения титаномагнетита, имеют возраст от докембрия до кайнозоя. Преимущественно они размещены в областях докембрийской и палеозойской складчатости. Крупные месторождения титаномагнетитовых руд, расположенные на древних платформах и в зоне обрамления кристаллических щитов, сформировались в докембрии (Чинейское и др.). Ти-

Группировка магматогенных титаномagnetитовых месторождений РФ по формационной принадлежности
(Борисенко Л.Ф., 1973, 1983) [51]

Магматическая формация	Главные особенности рудоносных массивов	Рудоносные породы	Форма рудных тел и характер оруденения	Минеральные типы руд	Содер- жание в рудах Fe, %мас.	Характерные месторождения (район)
Дунит-пироксе- нит-габбровая	Межформацион- ные интрузии, вытянутые в ви- де поясов	Пироксенит, верлит, горн- blendит, габ- бро	Залежи слож- ной формы. Ру- ды вкраплен- ные, редко шли- рообразные и мелкопрожилко- вые	Титаномagnetи- товые, редко апатит-титано- magnetитовые с сульфидами	14-18	Гусевгородское, Качканарское, Первоуральское (Урал)
Габбро-диорит- диабазовая	Вытянутые пла- стообразные кру- топадающие тела	Габбро и амфиболи- зированное габбро	Пласто- и жилооб- разные формы. Руды вкраплен- ные и сплошные	Ильменит-тита- номagnetито- вые, магнетитоиль- менитовые	20-26	Копанское, Мед- ведевское, Мат- кальское (Урал)
Базальт-сиенит- пироксенитовая	Удлиненный крутопадающий массив	Пироксенит	Залежи. Руды вкрапленные	Апатит-титано- magnetитовые	15-20	Суроямское (Урал)
Габбро-сиенито- вая	То же	Габбро	Линзовидно-пла- стовая форма. Руды вкраплен- ные и сплошные	Ильменит-тита- номagnetито- вые; апатит-тита- номagnetит-иль- менитовые	До 50 (для сплош- ных руд)	Гремяха-Вырмес (Кольский п-ов)

Габбро-диабазовая	Вытянутые дайкообразные тела пологого залегания	Габбро-диабаз	Пластообразная форма. Руды вкрапленные	Титаномагнетитовые с небольшим количеством сульфидов	20-30	Пудожгорское, Койкарское (Карелия)
Габбро-анортитовая	Вытянутый моноклинально падающий плутон	Габбро, пироксениты	Линзовидные тела вкрапленных руд и жилы массивной руды	Ильменит-титаномагнетитовые; апатит-ильменомангнетитовые	До 50 (для сплошных руд)	Большой Сейим (Амурская обл.)
Расслоенных габброидов	Расслоенный плутон	Габбро-нориты, габбро	Линзо- и пластообразные тела вкрапленных и сплошных руд	Титаномагнетитовые с ильменитом	40-60 (для сплошных руд)	Чинейское (Читинская обл.)
Щелочно-ультраосновная	Воронкообразный интрузив зонального строения (кольцевой в плане)	Пироксениты	Жилообразные и гнездообразные рудные образования. Руды вкрапленно-прожилковые	Перовскит-титаномагнетитовые	17-18	Африканда (Кольский п-ов)

титаномагнетитовые месторождения геосинклинальных областей имеют преимущественно ранне- и среднепалеозойский возраст. Некоторые из них достигают внушительных размеров (Гусевогорское, Качканарское). Таким образом, для магматогенных месторождений титаномагнетита выделяют две главные эпохи рудообразования: докембрийская и ранне-среднепалеозойская. Форма рудных тел с титаномагнетитом магматогенных месторождений довольно разнообразна: жилы, прослои и шлиры сплошных руд (Чинейское и др.); зоны, линзы, жилообразные тела, пластообразные или трубообразные залежи преимущественно вкрапленных или шлирово-вкрапленных руд (Гусевогорское, Первоуральское и др.).

Пластообразные обособления массивных титаномагнетитовых руд обычно залегают согласно с общей расслоенностью мафит-ультрамафитовых массивов. Как правило, крупные пластообразные или жильные тела сплошных руд находятся среди габбровых массивов. На многих титаномагнетитовых месторождениях встречаются как вкрапленные, так и массивные руды (Чинейское, Копанское и др.). Переходы между рудными (вкрапленными) и безрудными участками в основном постепенные, тогда как сплошные руды имеют резкие границы с вмещающими породами. Однако непосредственно в зоне перехода между ними часто наблюдается мелкая вкрапленность рудных минералов того же состава, что и в сплошных рудах.

По минеральному составу руды магматогенных месторождений главным образом титаномагнетитовые, но встречаются также ильменит-титаномагнетитовые, апатит-титаномагнетитовые и др. Состав рудных минералов и их количественное сочетание существенно зависят от состава магматических пород, а также от их формационной принадлежности. Так, в габброидах анортозитовой формации значительно распространен ильменит, а во всех остальных мафит-ультрамафитовых формациях преобладает титаномагнетит. Содержание Fe во вкрапленных рудах обычно находится на уровне 14-30%, в сплошных рудах может достигать 60% (см. табл. 1), иногда 70%. Так, на Гусевогорском месторождении вкрапленные руды в среднем содержат 16-20% общего железа, из них 10-14% Fe связано с титаномагнетитом и 4-8% — с силикатами [52].

Типы текстур титаномагнетитовых руд: массивные, вкрапленные, пятнистые, пятнисто-вкрапленные, вкрапленно-полос-

чатые, полосчатые. Наибольшее распространение имеют вкрапленные руды.

Вкрапленность титаномагнетита в рудах имеет различные размеры. Например, на Гусевогорском месторождении, согласно принятой классификации, наиболее распространены тонковкрапленные (0,074-0,2 мм), мелковкрапленные (0,02-1 мм) и средне-вкрапленные (1-3 мм) руды. На Первоуральском месторождении зернистость руд значительно крупнее: мелкозернистые (<1 см), среднезернистые (1-2 см), крупнозернистые (2-5 см), особо крупнозернистые (>5 см) (Малышев Н.Н., 1957). Текстурные разновидности руд являются главным критерием для их технологической классификации, которая учитывается при разработке обогащательных схем для конкретных месторождений [52].

Различное количество типов руд конкретных месторождений настоятельно требует проведения на них геолого-технологического картирования, что обеспечивает возможность усреднения руд при добыче и обогащении. Результаты геолого-технологического картирования широко используются Качканарским ГОКом.

Для титаномагнетита магматогенных месторождений часто характерны повышенные содержания титана (до 20% TiO_2) и ванадия (обычно до 1%). На некоторых титаномагнетитовых месторождениях в рудах наблюдаются повышенные содержания фосфора (апатит), иногда меди (халькопирит, борнит и др.) [14]. В настоящее время добыча титаномагнетитовых руд в значительной степени производится ради содержащегося в них ванадия (РФ, ЮАР, КНР). Более 90% производимого во всем мире ванадия извлекается из титаномагнетитовых концентратов. Перспективно получение из них Ti, Sc, Mn, Al и др. Запасы Ti, V и других примесных элементов, содержащихся в титаномагнетитовых рудах, значительные. Достаточно сказать, что в рудах Гусевогорского месторождения запасы V_2O_5 составляют 8,25 млн т (или 4,5 млн т ванадия) при содержании в руде 0,08-0,17% V_2O_5 [14]. Это составляет около 25% от мировых ресурсов ванадия [64] и обеспечивает его производство на многие годы.

Помимо эндогенных титаномагнетитовых месторождений существенную роль могут сыграть пляжные и особенно прибрежно-морские россыпи (так называемые черные пески). Наиболее крупные запасы титаномагнетита в них известны в Новой Зеландии, Японии, Филиппинах, Египте. В РФ довольно значительные месторождения этого типа находятся на Курилах (о-ва Итуруп,

Кунашир, Парамушир), на западном берегу Татарского пролива и на Камчатке. По минеральному составу указанные россыпи обычно ильменит-титаномагнетитовые или ильменит-титаномагнетит-титаномаггемитовые. Характерным примером являются ильменит-титаномагнетитовые россыпи Курильских островов, где выделяются три типа: мелко-среднезернистые (0,23-0,45 мм) хорошо отсортированные пироксен-плагиоклазовые пески с ильменитом и титаномагнетитом; граувакки, содержащие титаномагнетит, мелкозернистые (0,20-0,24 мм) и менее отсортированные средне-крупнозернистые (0,50-0,73 мм). Промышленными считаются только россыпи первого типа. Все россыпи отчетливо слоистые. На 1 м мощности россыпи приходится 30-55 рудных слоев. Содержание рудных минералов составляет 10-50% (Жижин Д.П., Гриценко И.И., 1977). Содержание титаномагнетита в прибрежной россыпи бухты Магнетитовой (Татарский пролив) колеблется от 7 до 35% (Кутолин В.А., Прусевич А.А., 1984). Однако, несмотря на повышенные содержания титаномагнетита в пляжных и прибрежных россыпях, их запасы в РФ оценены пока недостаточно полно.

МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТИТАНОМАГНЕТИТА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РУД

Титаномагнетит обычно является главным рудным минералом большинства магматогенных месторождений железа, пространственно и генетически связанных с массивами ультрамафитов и мафитов [6,14,55,58 и др.]. В этих породах титаномагнетит встречается в виде мелкой вкрапленности или в виде сплошных мелкозернистых выделений (шлиры, пласты и т.д.). Титаномагнетит, как правило, не является мономинеральным образованием, а состоит из нескольких минералов: магнетита (матрица), ильменита, ульвошпинели, шпинели (включения в матрице). Обычно титаномагнетит всех магматогенных месторождений характеризуется наличием специфических структур распада твердых растворов. В качестве второй минеральной фазы, образующей пластинчатые обособления в магнетите, часто преобладает ильменит. Его пластинки ориентированы преимущественно параллельно (111). Пластинки ильменита выделились несколько

раньше шпинели, и они довольно часто секутся ее вростками, ориентированными по (100).

При большом увеличении (обычно в электронном микроскопе) наблюдается тончайшая решетка ульвошпинели (Fe_2TiO_4) и совсем мелкие пылевидные выделения шпинели. Установлено, что ульвошпинель характерна для титаномагнетита магматических месторождений (Чернышева Л.В., Гайдукова В.С., 1980). Присутствие в большинстве исследованных образцов титаномагнетита Al_2O_3 (табл. 2) подтверждает наличие в нем шпинели, которая обычно относится к плеонасту или герциниту. Предполагать присутствие Al в виде механической примеси, главным образом силикатов, ввиду низкого содержания в титаномагнетите кремния, нет оснований. Л.В.Чернышевой и др. [58] с помощью микрорентгено-спектрального анализа в титаномагнетите Качканарского месторождения определен состав включений шпинели, отвечающий формуле $(\text{Mg}_{1,97}\text{Fe}_{0,26})\text{X}(\text{Al}_{1,97}\text{V}_{0,01}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_4$, что соответствует составу плеонаста, содержащего 30% герцинитовой молекулы.

Реже, в качестве очень мелких включений, в титаномагнетите встречается кульсонит (FeV_2O_4). Он отмечался в титаномагнетитовых рудах только с большим содержанием ванадия — до нескольких процентов (Индия). В рудах с меньшими содержаниями ванадия кульсонит, как правило, не наблюдается. Благодаря постоянному наличию в титаномагнетите включений других минералов (также изоморфных примесей) количество железа в нем колеблется от 59 до 68% [52]. На примере титаномагнетитовых руд качканарского типа было показано заметное влияние структур распада титаномагнетита на показатели их обогащения (табл. 3). Это обстоятельство учитывается при эксплуатации титаномагнетитовых месторождений [62].

По содержанию TiO_2 выделяются три разновидности титаномагнетита: малотитанистый (1-4%), среднетитанистый (5-9%) и высокотитанистый (10-20% TiO_2). Малотитанистый титаномагнетит обычно характерен для руд дунит-пироксенит-габбровой формации, средне- и высокотитанистый — для остальных формаций. Обычно высокое содержание титана в титаномагнетите сопровождается большим количеством включений ильменита в этом минерале. Размер этих включений от нескольких микронов до десятых долей миллиметра. В целом структуры распада твердых растворов, где пластинчатые включения в значительной сте-

Химический состав титаномагнетита месторождений РФ

Компо- ненты	Дунит-пироксенит-габбровая				Габбро-диорит-диабазовая	
	Гусевогорское	Качканарское (пироксенит)	Первоуральское (горн-блендит)	Волковское (габбро)	Медведевское	Копанское (габбро)
SiO ₂	0,38	0,85	0,40	0,46	1,80	1,46
TiO ₂	3,22	3,77	1,91	7,11	10,25	12,31
Cr ₂ O ₃	0,02	0,05	Не обн.	-	Не обн.	Не обн.
Fe ₂ O ₃	61,97	57,50	63,41	56,40	51,40	47,88
Al ₂ O ₃	1,45	2,77	3,40	3,97	2,50	3,53
V ₂ O ₃	0,40	0,45	0,62	0,92	0,73	0,72
FeO	29,33	32,34	28,24	28,52	31,33	32,70
MnO	0,28	0,34	0,18	0,33	0,15	0,17
MgO	1,42	1,18	0,99	1,39	0,77	0,96
CaO	0,46	0,63	Не обн.	0,38	0,46	0,33
H ₂ O	0,61	-	0,39	0,37	-	-
Сумма	99,54	99,88	99,54	99,85	99,38	99,86

* 0,09% TR₂O₃.

Примечание. По Волковскому месторождению анализы выполнены ным - выполнены Т.Н.Мачихиной.

пени представлены ильменитом, являются одним из характерных признаков титаномагнетита магматических месторождений. Отмечено [60], что повышение уровня содержания TiO₂ в титаномагнетите находится в тесной прямой зависимости от увеличения суммарного количества титаномагнетита и ильменита в руде. В интрузивах юга Сибири, где распространены сплошные титаномагнетитовые руды (на Арсеньевском, Ангаханском, Чинейском и других месторождениях), увеличение содержания TiO₂ происходит постепенно. В массивах с бедновкрапленным оруденением (Патынском, Хаактыг-Ой, Слюдинском) эти изменения проявлены более четко.

Титаномагнетит магматогенных месторождений всех изученных формаций постоянно содержит повышенное количество титана и целую группу элементов-примесей — V, Mn, Sc, Ga (табл. 4). Кроме того, в них обнаружены Mg, Cr, Ni, Co (Бори-

различных магматических формаций [51]

Габбро-диабазовая		Габбро-анортозитовая		Расслоенных габброидов	Габбро-сиенитовая	Щелочно-ультраосновная
Пудожгорское	Койкарское (габбро-диабазы)	Калаирский массив (габбро-нориты)		Чанейское (габбро)	Гремяха-Вырмес	Африканда*
0,97	2,14	0,95	1,41	Не обн.	0,69	0,69
14,58	18,43	7,20	8,60	8,80	15,16	7,94
-	-	0,75	2,10	Не обн.	-	-
47,13	41,13	55,41	54,55	64,06	44,50	57,26
0,58	2,49	3,69	4,57	2,17	4,22	1,33
0,73	1,05	0,57	0,65	0,55	0,38	0,03
34,30	33,90	30,29	27,09	23,00	32,75	29,45
0,11	0,21	0,19	0,15	0,10	0,47	0,70
0,95	Не обн.	0,39	0,68	0,61	1,60	0,40
0,29	0,24	0,25	0,26	0,33	-	2,42
-	-	-	-	Не обн.	-	0,54
99,64	99,59	99,69	100,06	99,62	99,77	100,76

В.Н.Архангельской, по Гремяха-Вырмес и Африканда взяты из [39], по осталь-

сенко Л.Ф. и др., 1976) [58]. Титан преимущественно содержится во включениях ильменита и в магнетитовой матрице не накапливается (табл. 5). Ванадий, наоборот, концентрируется в магнетите. В равной степени это относится к пластинчатым выделениям ильменита в титаномagnetите и к отдельным зернам ильменита, находящимся в парагенезисе с титаномagnetитом. Эта же тенденция распределения ванадия между титаномagnetитом и ильменитом отмечена для Лысанской группы месторождений Восточного Саяна (Глазунов О.М. и др., 1985). Наоборот, скандий накапливается в ильмените (до 150 г/т Sc), не образуя сколько-нибудь заметных скоплений в магнетите (обычно до 20 г/т Sc) [9].

Отмечена повышенная концентрация марганца в ильмените (до 1,4%) по сравнению с титаномagnetитом (0,47%). Интервал содержаний Mn в титаномagnetите Лысанской группы месторождений составляет 0,1-0,78% (Глазунов О.М. и др., 1985). В це-

Таблица 3

Влияние структур распада титаномагнетита на показатели обогащения руд качканарского типа (Самойлов П.И. и др., 1969) [52]

Основные показатели обогащения	Текстурный тип оруденения		
	Среднекрупный		Мелкокрупный
	I	2	I
Содержание в руде, %:			
Fe	21,8	19,6	20,4
V ₂ O ₅	0,20	0,17	0,16
TiO ₂	1,73	1,56	1,47
Выход, %:			
концентрата	27,4	23,6	25,0
хвостов	72,6	76,4	75,0
Содержание в магнитной фракции, %:			
Fe	62,1	64,06	60,3
V ₂ O ₅	0,65	0,65	0,61
TiO ₂	3,54	3,28	3,85
Содержание в немагнитной фракции, %:			
Fe	6,8	5,9	7,0
V ₂ O ₅	0,03	0,02	0,01
TiO ₂	1,05	1,02	0,68
Извлечение, %:			
Fe	78,0	76,34	73,9
V ₂ O ₅	89,1	90,77	95,3
TiO ₂	56,0	49,8	65,3

Примечание. 1-Сидеронитовый со структурой распада магнетит-шпинели;
2-Сидеронитовый без структур распада титаномагнетита.

лом содержание Mn в титаномагнетите рудных месторождений мафит-ультрамафитовых формаций сравнительно постоянно (0,2-0,5%). Оно несколько выше в титаномагнетите габбро-анортзитовой, щелочно-ультраосновной и габбро-пироксенитовой формации. Уровень содержания Mn в титаномагнетите Гусевгорского месторождения около 0,2-0,3% (Фоминых В.Г. и др., 1967).

**Содержание TiO_2 , Mn, V, Sc, Ga в титаномagnetите
магматических месторождений [6]**

Магматическая формация	Месторождение	Содержание компонентов, г/т				
		TiO_2^*	Mn	V	Sc	Ga
Габбро-диорит- диабазовая	Копанское, Медведевское, Маткальское (Урал)	10,6 (72)**	2000 (44)	4650 (22)	16,7 (36)	43,5 (21)
Дунит-пироксе- нит-габбровая	Гусевгорское, Качканарское, Висимское, Первоуральское, Волковское	3,8 (196)	1900 (99)	3500 (136)	14,9 (76)	39,7 (91)
Базальт-сиенит- пироксенитовая	Суроямское (Урал)	3,4***	2300***	1800 (5)	2,0 (3)	30,6 (5)
Габбро-сиенито- вая	Гремяха-Вырмес (Кольский п-ов)	15,2 (4)	2800 (35)	3700 (17)	20,0 (19)	29,0 (4)
Габбро-диабазо- вая	Пудожгорское, Койкарское (Карелия)	15,0 (29)	3200 (67)	4200 (41)	16,7 (36)	19,0 (12)
Габбро-анортози- товая	Кручининское (Забайкалье), Цагинское (Кольский п-ов)	13,4 (23)	3400 (19)	3500 (20)	37,0 (9)	46,0 (10)
Расслоенных габброидов	Чинейское (Забайкалье)	10,4 (24)****		4700 (18)****		
Щелочно-ультра- основная	Кугда, Бор-Урях, Одинхинча (Си- бирь), Салма (Кольский п-ов)	9,1 (51)	3000 (107)	810 (53)	19,2 (9)	40,0 (15)

* В процентах.

** В скобках указано число проб.

*** Титаномagnetитовый концентрат (Селивестров Г.Ф. и др., 1969).

**** Массивная руда (Куликов А.И., 1982).

Титаномagnetит рудных месторождений большинства ма-
фит-ультрамафитовых формаций содержит несколько повышен-
ное количество хрома (0,1-0,4%). Наибольшие его значения (до
2-3%) установлены для некоторых месторождений дунит-пиро-
ксенит-габбровой и ультраосновной-щелочной формаций (Бори-

сенко Л.Ф., Лапин А.В., 1971). В целом содержание хрома в титаномагнетите характеризуется значительным размахом колебаний. Для титаномагнетита Лысанской группы месторождений — 0,003-0,8% Cr (Глазунов О.М. и др., 1985). Для месторождений дунит-пироксенит-габбровой формации Урала — 0,001-2% Cr (Борисенко Л.Ф., 1966, 1973; Фоминых В.Г. и др., 1967).

Таблица 5

Содержание V и Ti в ильмените и магнетите
(структура распада твердого раствора), %мас. (Борисенко Л.Ф., 1983)

Минерал	V	Ti	Ti/V
Ильменит (пластинчатые включения в магнетите)	0,14	30,72	219,4
Магнетит (основная масса)	0,67	0,72	1,07

Характерна повышенная галлиеносность титаномагнетита всех исследованных магматических формаций до 68 г/т Ga, в среднем около 40 г/т Ga (см. табл. 4), тогда как в ильмените установлено до 15 г/т Ga. Его распределение в титаномагнетите различных магматических формаций довольно равномерное [4].

Титаномагнетит россыпных месторождений составляет преобладающую (или значительную) часть магнитной фракции. Для него, как и для эндогенных образований, характерны структуры распада твердых растворов, где включения ильменита ориентированы по (111). Для россыпей Татарского пролива размер его зерен находится в пределах 0,0п-0,5 мм. Титаномагнетит частично окислен и превращен в титаномаггемит. Так как материнской породой для титаномагнетитовых россыпей являлись основные эффузивы (Курильские о-ва, Татарский пролив), он характеризуется повышенной титанистостью. Концентрат россыпей Курильских островов имеет состав (%): Fe — 57,5-59,7; TiO₂ — 9,8-10,0; V₂O₅ — 0,41-0,43 (Жижин Д.П., Гриценко Н.И., 1977). Состав магнитной фракции россыпей Татарского пролива (%): SiO₂ — 5,92; TiO₂ — 11,33; Fe₂O₃ — 51,69; Al₂O₃ — 2,83; V₂O₃ — 0,40; FeO — 22,45; MnO — 0,60; MgO — 2,37; CaO — 0,98; Na₂O — 0,36; K₂O — 0,33; P₂O₅ — 0,19; сумма — 99,44 (Кутолин В.А., Прусевич А.А., 1984). Полученный состав магнитной составляющей россыпей в общем

близок к химическому составу титаномагнетита большинства мафит-ультрамафитовых формаций (см. табл. 3). В особенности это касается титана и ванадия. Обращает на себя внимание несколько повышенное содержание скандия (табл. 6) в магнитной фракции (до 73,3 г/т) и наличие в ней редкоземельных элементов (Ce, Nd, La), которые обычно не отмечаются в титаномагнетите магматогенных месторождений.

МЕТАЛЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ И ЗОЛОТО В ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУДАХ

Присутствие металлов платиновой группы (МПГ) неоднократно отмечалось в титаномагнетитовых рудах [9,21,41,65]. В особенности это касается руд качканарского типа (Латыш И.К., 1959; Разин Л.В., Юркина К.В., 1971; Фоминых В.Г. и др., 1974; Волченко Ю.А. и др., 1970,1973; Бегизов В.Д. и др., 1975; Борисенко Л.Ф. и др., 1969,1971,1975). Общая тенденция распределения МПГ в ультрамафитах дунит-пироксенит-габбровой формации Урала, в которую входят Гусевогорское и Качканарское месторождения, такова: $\text{Pt} > \text{Pd} > \text{Ir} > \text{Rh} > \text{Os} > \text{Ru}$ [9]. Установлено, что в рудных пироксенитах эксплуатируемого Гусевогорского месторождения их средние содержания в 3-10 раз больше по сравнению с их кларками для земной коры [28]. В рудах Гусевогорского и Качканарского месторождений МПГ содержатся в двух основных формах: собственно минералы, которые выделяются в самостоятельную фракцию и могут быть диагностированы, и примеси в породообразующих и рудных минералах.

Основным платиновым минералом в рудах качканарского типа является поликсен (% мас.): Pt — 88,1; Ir — 1,0; Rh — 0,8; Fe — 0,5; Cu — 0,8 и Ni — 0,1. Редко встречаются платинистый осмирид, осмий самородный, родистый иридий, которые обычно в виде мелких включений содержатся в поликсене. Еще реже в зернах поликсена отмечаются включения сульфидов платиновых металлов: осмиевый лаурит, эрликманит, ку-

* О.Е.Юшко-Захарова. Платиноносность рудных месторождений. — М.: Недра, 1975. — 248 с.

**Содержание TiO₂, V, Sc, Ce, Nd, La в рудных фракциях россыпей Татарского пролива
и коренных пород области сноса (Кутолин В.А., Прусевич А.Л., 1984)**

Породы	Продукты обогащения (главные рудные минералы)	Содержа- ние TiO ₂ , %	Содержание, г/т				
			V	Sc	Ce	Nd	La
Россыпи прибрежно-морские	Неразделенный рудный концентрат (в основном титаномагнетит и ильменит)	<u>8,2-15,6</u> 12,55 (6)	<u>1800-3900</u> 2500 (6)	<u>0,09-51,6</u> 24,5 (8)	<u>27,3-71,6</u> 48,8 (8)	<u>11,7-28,5</u> 20,7 (5)	<u>15,4-45,5</u> 30 (5)
	Магнитная фракция (титаномагнетит, титаномаггемит)	<u>7,2-14,8</u> 11,33 (24)	<u>1300-3700</u> 2700 (24)	<u>10,2-73,3</u> 31,7 (16)	<u>10,1-30,4</u> 18,3 (16)	<u>6,8-40,9</u> 16,5 (14)	<u>6,8-18,6</u> 12,7 (14)
	Электромагнитная фракция (гематит, титаномагнетит, ильме- нит, ильменогематит)	<u>11,5-32,2</u> 21,28 (10)	<u>1100-2500</u> 1800 (10)	<u>37,9-85,3</u> 65,4 (8)	<u>21,8-50,6</u> 38,8 (8)	<u>16,4-46,9</u> 28,2 (8)	<u>15,2-31,3</u> 25,2 (8)
Андезиты-базальты и андезиты кизин- ской серии и кузне- цовской свиты	Магнитная фракция (титаномагнетит)	<u>5,2-14,4</u> 10,38 (11)	<u>1340-5490</u> 2900 (11)	<u>0,28-59,1</u> 37,4 (13)	<u>7,5-27,1</u> 14,1 (12)	<u>4,9-27,6</u> 18,5 (12)	<u>3,3-20,0</u> 9,6 (12)

Примечание. В числителе - пределы содержаний, в знаменателе - среднее содержание, в скобках - число проб.
Средние содержания магнитной и электромагнитной фракций в рудном концентрате россыпей 81,6 и 18,4%.

перит и др.* Поликсен парагенетически связан с титаномagnetитом, диопсидом и оливином. Определение гранулометрического состава зерен поликсена показало, что наиболее распространенная их крупность меньше 0,1 мм. Очень редко встречаются зерна размером до 3 мм [9].

В сульфидном концентрате, полученном из титаномagnetитовых руд Гусевогорского месторождения, установлены палладистые минералы. Однако размеры их чрезвычайно малы, и они обнаружены только в виде мельчайших включений (менее 70 мкм) в сульфидах (Волченко Ю.А., 1970). Диагностированы вислоцит, стибипалладинит, бреггит и сперрилит. Раздельное определение Pt и Pd, содержащихся в сульфидном концентрате показало, что наибольшее количество приходится на Pd и только 6% — на Pt.

Таким образом, в рудах Гусевогорского месторождения установлены две основные ассоциации МПГ, которые разделяются при получении серого шлиха (в основном Pt) и сульфидного концентрата (в основном Pd). При обогащении крупных проб пироксенитов (1500-1600 кг) в сером шлихе установлено 525 г/т Pt и Pd [9].

Часть МПГ содержится в виде неструктурной примеси в пороодообразующих и рудных минералах (мельчайших включений собственных минералов), а также в виде атомов, сорбированных силикатами и рудными минералами. Характерно, что содержания Pt и Pd не коррелируют с содержаниями магния и элементами семейства железа (Юшко-Захарова О.Е., 1975). Это принципиально отличает их от других редких и малых элементов, содержащихся в рудных ультрамафитах: Sc, V, Ga, Cr, Mn, Co, Ni (Борисенко Л.Ф., 1966). Последние, как правило, содержатся в пороодообразующих и рудных минералах в виде изоморфной примеси. Наоборот, МПГ, рассеянные в рудах качканарского типа, обычно не занимают места в узлах кристаллической решетки этих минералов. Согласно расчетам О.Е. Юшко-Захаровой (1975), в рудах Гусевогорского месторождения только 7-12% Pt и Pd при-

* В.Д.Бегизов, Л.Ф.Борисенко, Е.Д.Усков. Сульфиды и природные твердые растворы платиноидов из ультрабазитов Гусевогорского массива (Урал) // Докл. АН СССР. — 1975. — Т.225. — С.1408-1411.

ходится на рассеянную форму, остальная же их часть представлена собственными минералами.

В процессе обогащения руд МПГ могут накапливаться как в титаномагнетитовом концентрате, так и в хвостах обогащения (табл. 7). В особенности это касается платины и родия, содержания которых довольно устойчиво превышают их кларки. Для платины коэффициент концентрации (КК) в титаномагнетитовом концентрате, агломерате, окатышах равен 12-13, для родия — 12-17. Для хвостов КК платины достигает 13,5, тогда как для родия КК в хвостах имеет наименьшее значение (3,3), по сравнению с питанием и со всеми продуктами обогащения. В целом для Au уровень обогащения носит весьма устойчивый характер во всех полученных продуктах и хвостах. Для родия степень концентрации в продуктах обогащения и хвостах менее равномерна. Установленные повышенные содержания МПГ в продуктах обогащения ГОКа повышают их ценность и настоятельно требуют дальнейшего изучения.

Помимо МПГ в рудах качканарского типа постоянно присутствует золото [9,31]. Его содержание в них превышает кларк примерно в два раза. Среди всех рудных пород Гусевгорского месторождения наиболее устойчивые повышенные содержания Au установлены в горнблендитах (до 0,056 г/т), т.е. в тех породах, которые характеризуются повышенным содержанием сульфидов (до 5-7%). Сульфиды же содержат повышенное количество золота (до 0,31 г/т в пирите) (табл. 8). Во всех остальных породообразующих и рудных минералах его концентрация меньше (0,00п-0,0п г/т). Незначительно Au может накапливаться в роговой обманке (до 0,035 г/т), титаномагнетите (до 0,041 г/т) и ильмените (до 0,028 г/т). Содержание Au в породообразующих и рудных минералах неравномерное. В титаномагнетите максимальное его содержание может в 100 раз превышать минимальное.

В целом неравномерное распределение Au в титаномагнетитовых рудах качканарского типа объясняется рассеяно-вкрапленной формой его нахождения: в виде собственных минералов, которые могут быть выделены в тяжелый шлик и диагностированы; в тонкодисперсном состоянии в породообразующих и рудных минералах. В тяжелом шликке установлены самородное золото и электрум с отношением 1:1. В единичных случаях встречается медистое золото (Борисенко Л.Ф., Усков Е.Д., 1971).

Таблица 7

Содержание Pt, Rh, Au и кларки концентрации в промпродуктах и отходах Качканарского ГОКа [28]

Материал (число проб)	Pt		Rh		Au	
	Содержание, г/т*	КК**	Содержание, г/т	КК	Содержание, г/т	КК
Титаномagnetитовый концентрат (10)	$\frac{0,24-0,29}{0,26}$	13	$\frac{0,042-0,060}{0,052}$	17,3	$\frac{0,006-0,015}{0,009}$	1,8
Агломерат (10)	$\frac{0,18-0,28}{0,24}$	12	$\frac{0,024-0,054}{0,042}$	14	$\frac{0,006-0,023}{0,011}$	2,2
Окатыши (10)	$\frac{0,16-0,30}{0,24}$	12	$\frac{0,012-0,048}{0,036}$	12	$\frac{0,003-0,015}{0,007}$	1,4
Питание (10)	$\frac{0,14-0,43}{0,22}$	11	$\frac{0,015-0,048}{0,034}$	11,3	$\frac{0,003-0,019}{0,011}$	2,2
Хвосты (10)	$\frac{0,14-1,24}{0,27}$	13,5	$\frac{0,06-0,03}{0,01}$	3,3	$\frac{0,002-0,01}{0,0066}$	1,3

* В числителе - пределы содержаний, в знаменателе - среднее содержание.

** КК - кларки концентрации, т.е. отношение содержаний Pt, Rh и Au в материале к их кларку, взятому по О.Е.Юшко-Захаровой для Pt и Pd и по А.П.Виноградову для Au.

Самородное золото встречается в виде комковидных зерен размером обычно менее 0,5 мм. Его состав, %: Au — 94,46;

Таблица 8

Содержание золота
в минералах рудных ультрамафитов [9]

Минерал	Число проб	Содержание Au*, г/т
Оливин	2	0,0004-0,0165 (0,0085)
Диопсид	7	0,001-0,0088 (0,0047)
Роговая обманка	6	0,0085-0,035 (0,0178)
Титаномагнетит	21	0,004-0,041 (0,0028)
Ильменит	4	0,011-0,028 (0,0184)
Пирит	4	0,056-0,310 (0,1765)

* В скобках - среднее значение.

Ag — 3,38; Pt — 0,02; Jr, Rh, Ru — 1,72; Fe — 0,28; Cu — 0,1; Zn — 0,03; Ni — 0,01. Электрум образует более мелкие зерна ($\leq 0,1$ мм). Его состав, %: Au — 80,66; Ag — 18,24; Jr, Rh, Ru — 0,25; Fe — 0,7; Cu — 0,06; Zn — 0,07; Ni — 0,02. Наиболее распространенная крупность минералов Au соответствует классу крупности +0,2-0,4 мм. В пробах, из которых были выделены наиболее крупные зерна Au, отмечалось повышенное количество сульфидов.

В продуктах передела рудных пироксенитов (см. табл. 7) содержание Au несколько повышено в титаномагнетитовом концентрате и агломерате (до 0,023 г/т), но характеризуется общим невысоким уровнем содержания (0,0066 г/т) в хвостах обогащения Качканарского ГОКа.

Другим примером повышенного содержания МПГ и Au являются титаномагнетитовые месторождения в габбро-диабазе Карелии (Пудожгорское и Койкарское месторождения). Наибольшие концентрации МПГ и Au совмещены с участками повышенного содержания в титаномагнетитовых рудах халькопирита и борнита, которые приурочены к наиболее высокожелезистому интервалу руд (табл. 9). Лабораторными технологическими испытаниями доказана принципиальная возможность извлечения МПГ и Au из хвостов магнитной сепарации [37].

В эндоконтактных зонах Чинейского массива установлена сульфидная минерализация (халькопирит-пирротиновая и халькопирит-пиритовая) [24]. С нею связана платиноносность массива. В сульфидной фазе в среднем содержится 12,2 г/т МПГ при отношении Pd/Pt 1,13-9,66 в эндоконтакте руд [37]. Минеральная форма палладия представлена фрудитом, соболевскитом, содбе-

риитом и др.; платина концентрируется только в сперрилите, а родий — в холлингвортите [53].

Таблица 9

Содержание Pt, Pd, и Au в рудных габбро-диабаззах Карелии [37]

Месторождение	Мощность слоя, м	Содержание, мг/т		
		Pt	Pd	Au
Койкарское (участок Святкаволок)	7,4	321	854	304
Пудожгорское	5,3	505	1110	354

Приведенные данные о золотоносности и наличии МПГ в титаномagnetитовых рудах различных промышленно-генетических типах месторождений указывают на их перспективность в отношении этих металлов. Некоторые титаномagnetитовые месторождения также перспективны на медь. Например, халькопиритовые концентраты получены на Волковском и Суроямском месторождениях Урала. В этом концентрате последнего месторождения содержится 18,4% Cu (Селивестров Г.Ф. и др., 1969).

МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИЛИКАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД

В природе значительным распространением обладают вкрапленные титаномagnetитовые руды. Эта особенность характерна для железорудных месторождений большинства мафит-ультрамафитовых формаций. Наиболее крупные месторождения вкрапленного титаномagnetита в пироксенитах, горнблендитах и габбро приурочены к дунит-пироксенит габбровой формации Урала. Они также встречаются в пределах габбро-пироксенитовой формации Западного и Восточного Саяна. Наиболее характерным представителем в РФ являются титаномagnetитовые руды качканарского типа, которые на протяжении нескольких десятилетий эксплуатируются на Гусевогорском месторождении. В этих рудах количество титаномagnetита в среднем составляет 13-

20%. Это хорошо видно на примере основных видов руд Гусевгорского месторождения: диаллаговых, оливиновых и роговообманковых пироксенитов (табл. 10). Во всех этих типах руд суммарное содержание диопсида и роговой обманки колеблется в пределах 65-85%. С учетом распространенности рудных ультрамафитов Гусевгорского и Качканарского месторождений на долю диаллаговых, оливиновых и роговообманковых пироксенитов приходится 91,1 и 98,5% соответственно, т.е. они составляют главную часть запасов указанных месторождений.

Таблица 10

Средний минеральный состав основных типов руд
Гусевгорского и Качканарского месторождений (Усков Е.Д., 1983)

Минерал	Гусевгорское			Качканарское		
	Диалла- говые	Оливино- вые	Роговооб- манковые	Диалла- говые	Оливино- вые	Роговооб- манковые
Диопсид	74,8	65,8	62,8	75,4	63,7	65,9
Оливин	1,5	17,0	-	1,2	16,0	0,8
Роговая обманка	3,5	1,8	22,6	3,3	1,6	18,8
Серпентин	0,8	2,1	0,1	0,3	1,8	-
Шпинель	1,4	0,3	1,0	1,3	0,4	0,6
Титаномаг- нетит	17,3	13,0	13,1	17,5	15,6	19,6
Ильменит	0,7	0,6	0,4	1,0	0,9	0,3
Число проб	81	16	11	23	14	4

В процессе обогащения титаномagnetитовых руд на Качканарском ГОКе до 80% рудной массы в виде силикатных хвостов складывается в шламохранилище комбината, которых к настоящему времени уложено более 650 млн т [17]. Главным минеральным компонентом силикатных хвостов Качканарского ГОКа является диопсид. Выполненный в ИМГРЭ химический анализ этих отходов обогащения имеет следующий состав, % мас.: SiO_2 — 45,02; TiO_2 — 0,67; Al_2O_3 — 8,60; Fe_2O_3 — 4,35; FeO — 3,95; MnO — 0,14; MgO — 13,85; CaO — 20,28 Na_2O — 0,90; K_2O — 0,10; P_2O_5 — 0,12; H_2O^+ — 1,30; H_2O^- — 0,24; сумма — 99,52 (аналитик В.Д. Бо-

гомолова). Химический состав хвостов очень близок к составу монофракции диопсида, полученной из рудных диаллаговых пироксенитов Гусевогорского месторождения, % мас.: SiO_2 — 50,80; TiO_2 — 0,41; Al_2O_3 — 2,04; Fe_2O_3 — 3,50; FeO — 4,51; MnO — 0,11; MgO — 15,29; CaO — 23,31; Na_2O — 0,09; K_2O — 0,06; H_2O^+ — 0,70; сумма — 100,52 (аналитик В.Н.Архангельская)*.

Некоторое увеличение содержания алюминия в силикатных хвостах по сравнению с диопсидом объясняется присутствием роговой обманки, являющейся постоянным минеральным компонентом руд качканарского типа (см. табл. 10). Это касается как эксплуатируемого Гусевогорского, так и резервного Качканарского месторождений. Согласно В.Г.Фоминых и др. (1967), клинопироксены рудных пироксенитов Качканарской группы месторождений содержат, %: TiO_2 — 0,34-0,55; V_2O_5 — до 0,03; Fe_2O_3 — 3,6-4,15; MnO — 0,13-0,15; Al_2O_3 — 3,58-5,17; MgO — 14,1-15,53; Cr_2O_3 — 0,02-0,03.

Главную ценность в силикатных хвостах составляет скандий, который содержится в повышенных количествах в диопсиде и роговой обманке (табл. 11). Характер распределения скандия в минералах рудных пироксенитов показывает, что около 90-95% его количества, содержащегося в руде, приходится на диопсид и роговую обманку [7,9].

На долю титаномagnetита и ильменита приходится не более 5% от суммарного содержания Sc в руде. Вследствие такого характера распределения скандия в руде качканарского типа в процессе их обогащения подавляющая его часть накапливается в силикатных хвостах. Эти хвосты обогащения представляют собой потенциальное сырье для получения скандия [7,17].

При обогащении ильменит-титаномagnetитовых руд, связанных с габброидами, возможно получение самостоятельного плагиоклазового концентрата, пригодного для производства Al_2O_3 . Расчеты показали [61], что в процессе обогащения руд Харловского месторождения получается плагиоклазовый концентрат, в котором содержание глинозема на 4% выше, чем в самых высококачественных нефелиновых рудах Кия-Шалтырского месторождения. Попутное получение плагиоклазового кон-

*Л.Ф.Борисенко. Редкие и малые элементы в гипербазитах Урала. — М.: Наука, 1966.

**Содержание скандия в породообразующих и рудных минералах
пироксенитов Гусевогорского месторождения [9]**

Тип рудных пироксенитов	Минерал	Число проб	Содержание Sc*, г/т
Диаллаговый	Диопсид	19	98-155 (129,1)**
	Оливин	1	(4,5)
	Роговая обманка	2	104-135 (119,5)
	Титаномагнетит	14	12-20 (15,7)
	Ильменит	8	83-125 (97,6)
Роговообманко- вый	Роговая обманка	9	110-148 (124,9)
	Титаномагнетит	8	11-16,2 (13,9)
	Ильменит	4	83-100 (93,2)
Оливиновый	Диопсид	10	100-149 (123,0)
	Оливин	2	4,5-6,4 (5,6)
	Роговая обманка	4	78-120 (91,0)
	Титаномагнетит	10	10-22 (14,9)
	Ильменит	5	85-156 (114,0)

* В скобках - среднее значение.

** Определено методом активации. Аналитик С.М.Ляпунов (ИМГРЭ).

го месторождения. Попутное получение плагиоклазового концентрата может существенно снизить себестоимость других полезных компонентов (Fe, Ti, V) и повысить комплексность использования руд этого типа.

АПАТИТОНОСНОСТЬ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ И ИЛЬМЕНИТ-ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД

Апатит является частым спутником титаномагнетита в рудах месторождений различных мафит-ультрамафитовых магматических формаций. Его присутствие в повышенных количествах (10-40%) установлено в рудах месторождений дунит-пироксенит-габбровой формации (Волковское), габбро-диорит-диабазовой (Копанское), базальт-сиенит-пироксенитовой (Суоямское), габбро-сиенитовой (Гремяха-Вырмес), габбро-анортозитовой (Кру-

чининское, Геранское и др.). На этих месторождениях апатит-титаномагнетитовые и апатит-ильменит-титаномагнетитовые руды относятся к разряду промышленно ценных [23]. Например, на Кручининском месторождении в массивных рудах возможны следующие соотношения минералов: 30-40% апатита и 60-70% титаномагнетита и ильменита (Балыкин П.А., Шабалин Л.И., 1984). Значительной апатитоносностью характеризуются титаномагнетитовые руды Джугджурского габбро-анортоситового плутона, где в пределах Гаюмского рудного поля распространены богатые апатит-титаномагнетитовые руды, содержащие 10-90% апатита, до 10% ильменита и до 50-70% титаномагнетита. Для Маймаканского рудного поля характерны вкрапленные апатит-титаномагнетитовые руды в габбро-пироксенитах (до 15% апатита и 10-15% титаномагнетита) и сплошные руды, содержащие до 40% апатита и 50-60% титаномагнетита [33].

В целом бедные вкрапленные апатит-титаномагнетитовые руды в габброидах содержат 2,5-7% P_2O_5 [14], т.е. 6,1-17,2% апатита. В качестве перспективного сырья для получения P_2O_5 рассматриваются апатит-титаномагнетит-ильменитовые руды, связанные с габброидами. Их утвержденные запасы на 1990 г. составляют 9,8% от всех запасов месторождений апатита в СНГ. Однако их добыча мала и равняется всего 0,2% от общей добычи [14]. По запасам апатитсодержащие месторождения рассмотренных типов могут быть крупные, средние или мелкие. Апатит железорудных эндогенных месторождений постоянно содержит РЗЭ, сумма которых может достигать 0,28% (Борисенко Л.Ф., Ляпунов С.М., 1981) или 0,22% (Васильева З.В., 1968). В целом для апатита рассмотренных месторождений характерен преимущественно цериевый состав РЗЭ.

ЗАПАСЫ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД РФ И ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

На территории России выделяются несколько провинций, в которых находятся главные месторождения титаномагнетита: Балтийский кристаллический щит, Сибирская платформа, Байкалиды юго-западного обрамления Сибирской платформы,

Уральская, Алтае-Саянская. В настоящее время балансом учтены два крупнейших месторождения титаномагнетитовых руд РФ (Гусевогорское и Качканарское), находящиеся в пределах Уральской провинции. Запасы титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения при среднем содержании 16,6% Fe на 1.01.93 составляют (по категориям А+В+С₁) 3,4 млрд т. Общие балансовые запасы руд этого месторождения достигают 5,8 млрд т [14]. Запасы руд Качканарского месторождения составляют 3,5 млрд т при том же содержании в них железа. Суммарно на два этих месторождения приходится 11,6% от всех балансовых запасов железа в России. Незначительная часть запасов титаномагнетитовых руд приходится на Первоуральское и Волковское месторождения (Урал). Помимо железа в титаномагнетитовых рудах Гусевогорского, Первоуральского и Волковского месторождений заключено 93,8% от всех балансовых запасов (категории А+В+С₁+С₂) ванадия России [5]. Эти запасы обеспечивают сырьевую базу ванадия в РФ на многие годы. Технология извлечения ванадия из титаномагнетитовых концентратов разработана и внедрена [8,10,37]. Крупные запасы титаномагнетитовых руд сосредоточены в Сибири. По данным В.А.Кузнецова и др. [19], на месторождениях Мало-Тагульском, Верхне-Ийском, Хаактыг-Ойском, Харловском и Чинейском запасы титаномагнетитовых руд более 10 млрд т. Прогнозные ресурсы титаномагнетитовых руд Лысанской группы месторождений превышают 1 млрд т (Курлович В.Н., 1970). По данным В.И.Иванова (1979), общие запасы титаномагнетитовых руд главнейших месторождений Сибири (вместе с прогнозными) составляют 11,1 млрд т (табл. 12). Руды этих месторождений в основном вкрапленные со средними содержаниями железа 15-30%. Относительно недавно разведанное месторождение Большой Сейим имеет установленные запасы руд около 275 млн т [14]. В целом запасы титаномагнетитовых и апатит-титаномагнетитовых (ильменитовых) руд габбро-анортозитовой формации Джугджурского и Каларского массивов значительны. Маймеча-Котуйскую провинцию, расположенную на Севере Сибирской платформы, следует рассматривать как крупный железорудный район, где прогнозные запасы титаномагнетитовых руд на месторождениях Бор-Урях, Кугда и Гулинском составляют 3,4 млрд т. При вероятности распространения руд до глубины 800 м возможно увеличение запасов до 20 млрд т [18].

Таблица 12

Запасы титаномагнетитовых руд месторождений Сибири [18]

Край, провинция или район	Месторожде- ние	Запасы руд вместе с про- гнозными ре- сурсами, млн т	Содержание Fe, %		Извлечение в концентрат Fe, %	Общие запасы извлекаемого Fe, млн т
			в рудах	в концентрате		
Северо-Байкаль- ский район	Слюдянское	400	48	65	73	140
Восточно-Саян- ская провинция	Мало-Тагуль- ское	1300	26	65	75	255
	Верхне-Ийс- кое	1000	30	55	75	225
	Хаактыг-Ой	1000	27,2	61	73	200
Красноярский край	Лысанская группа	1000	22,8	54	67	150
Маймеча-Котуй- ская провинция	Бор-Урях	1000	21,6	-	-	-
	Кугда	600	20,0	-	-	-
	Гулинское	1800	20,4	-	-	-
Алтайский край	Харловское	3000	15,3	60	50	230

Прогнозные ресурсы титаномагнетитовых руд Пудожгорского и Койкарского месторождений в Карелии значительны (Гарбар Д.И., Чечаль Э.К., 1979). На Кольском полуострове перспективны ильменит-титаномагнетитовые месторождения габбро-сиенитовой формации, в частности Гремяха-Вырмес [2].

Прогнозные ресурсы ильменит-титаномагнетитовых руд Копанского, Медведевского и Маткальского месторождений, относящихся к габбро-диорит-диабазовой формации, достигают 4 млрд т (Овчинников Л.Н. и др., 1972); на Кытлымском и Висимском месторождениях дунит-пироксенит-габбровой формации 2 и 1 млрд т руды соответственно (Малахов А.Е., Фадеичев А.Ф., 1982). Прогнозные ресурсы руд Гусевгорского месторождения — 12 млрд т (Данилов Н.И. и др., 1997).

Заслуживают также внимания прогнозные ресурсы и запасы рудных песков (более 1 млрд т), установленные для россыпных месторождений Дальнего Востока РФ (Сенивов С.В. и др., 1989). В целом сырьевая база будущих горно-обогатительных комбинатов России может считаться достаточно надежной, при условии технологического освоения высокотитанистых титаномагнетитовых руд [14,18,25].

Главная добыча руд и получение титаномагнетитового концентрата в РФ производится Качканарским ГОКом на Гусевгорском месторождении, начиная с 1963 г., достигнув своего максимума в 1989-1990 гг. (табл. 13). В этот период добывалось 45 млн т руды ежегодно (более 8 млн т титаномагнетитового концентрата). Максимально достигнутые производственные показатели в РФ (до 1991 г.) составляют: по титаномагнетитовому концентрату — 8,2 млн т; по окускованному сырью — 7,2 млн т, по ванадиевому чугуну — 3,8 млн т; по ванадию в шлаке — 14 тыс.т [37].

Начиная с 1991 г. на Качканарском комбинате начался спад, который продолжается до настоящего времени (см. табл. 13). Это объясняется как снижением потребности металлургии РФ в доменном сырье, так и неплатежеспособностью металлургических предприятий. В 1993 г. было добыто 37,6 млн т титаномагнетитовых руд, что составляет около 20% от всей добычи железа в РФ. Особую ценность этот титаномагнетитовый концентрат Качканарского ГОКа представляет благодаря своей повышенной ванадиености. Как сам концентрат, так и полученные из него окатыши и агломерат, характеризуются довольно устойчивыми содержаниями $Fe_{общ}$ — 57-60,5% и V_2O_5 — 0,55-0,58% (табл. 14).

Таблица 13

Показатели работы Качканарского ГОКа [15]

Продукт, тыс. т	1989 г.	1990 г.	1991 г.	1992 г.
Руда	45170	45069	39437	37238
Вскрышная порода*	7193	8428	6996	5836
Концентрат	8171	8150	7260	6904
Агломерат	3332	3094	2861	2965
Окатыши	3830	4108	3733	3372
Щебень*	1806	1973	1926	1442

* Тис. м³.

Таблица 14

Качественные показатели товарной продукции Качканарского ГОКа [15]

Вид продукции	Средний химический состав		Регламентируемая доля фракций	
	Показатели	% мас.	Класс, мм	% мас.
Концентрат	Fe _{общ}	60,5	0,0-0,074	85,0
	FeO	26,6	5-20	-
	V ₂ O ₅	0,58	5-40	-
	Основность	0,39	Мелочь 0,5	-
	Влажность	9,5		-
Окатыши	Fe _{общ}	59,0	0,0-0,074	-
	FeO	4,0	5-20	96,0
	V ₂ O ₅	0,57	5-40	-
	Основность	1,25	Мелочь 0,5	3,0
Агломерат	Fe _{общ}	57,0	0,0-0,074	-
	FeO	13,0	5-20	-
	V ₂ O ₅	0,55	5-40	92,5
	Основность	1,25	Мелочь 0,5	7,5

Подсчитано, что при условии добычи 45 млн т руды в год Качканарский комбинат обеспечен запасами в проектных контурах отработки на 32,7 года, а общими балансовыми запасами

Гусевогорского месторождения — на 75,3 года [14,57]. Снижение объема добычи соответственно увеличивает срок эксплуатации этого месторождения.

Пляжные и прибрежно-морские россыпи Курильских островов и Татарского пролива могут способствовать укреплению железорудной сырьевой базы Дальнего Востока. Для этого типа титаномагнетитовых руд особенно привлекательна низкая стоимость добычи по сравнению с рудами эндогенных месторождений. Пример Японии и Новой Зеландии [62], которые эксплуатируют россыпи черных песков, подтверждает их перспективность в качестве источника титаномагнетита в РФ. Общие запасы прибрежно-морских россыпей Татарского пролива могут быть весьма большими, так как богатые титаномагнетитом эффузивные породы Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса протягиваются вдоль побережья на 700 км от м.Туманный до м.Лазарева. Общее количество высвободившегося за счет выветривания титаномагнетита за последние 10 тыс.лет составляет 0,5-2,75 млрд т (Кутолин В.А., Прусевич А.А., 1984). Даже частичное сохранение титаномагнетита в прибрежно-морских россыпях Татарского пролива делает их перспективными для будущей эксплуатации. Разработанный метод передела титаномагнетитового концентрата из россыпей Татарского пролива позволяет рассматривать их как возможный источник для получения железа, титана и ванадия [30].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАСШИРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД

Титаномагнетитовые руды довольно давно используются в целом ряде стран (РФ, ЮАР, Япония, Китай и др.) для производства чугуна, стали и извлечения ванадия. Особое внимание постоянно обращается на ванадий [5,8,10,39,59,64], так как титаномагнетит является для него главным сырьевым источником во всем мире. Способы получения ванадия совершенствуются, и степень его извлечения повышается [37]. Помимо ванадия, титаномагнетитовые руды в недалеком будущем могут стать источником для получения титана и скандия [6,7,35,39,48]. Не исключена возможность получения из них Mn, Al, Ga, Cr и др. Кроме

того, в настоящее время открылись перспективы широкого использования титаномагнетитового концентрата в качестве утяжелителя [16].

Основные способы металлургического передела титаномагнетитового сырья

Пирометаллургическая переработка титаномагнетитового концентрата имеет ряд особенностей, связанных с образованием титановых шлаков [39].

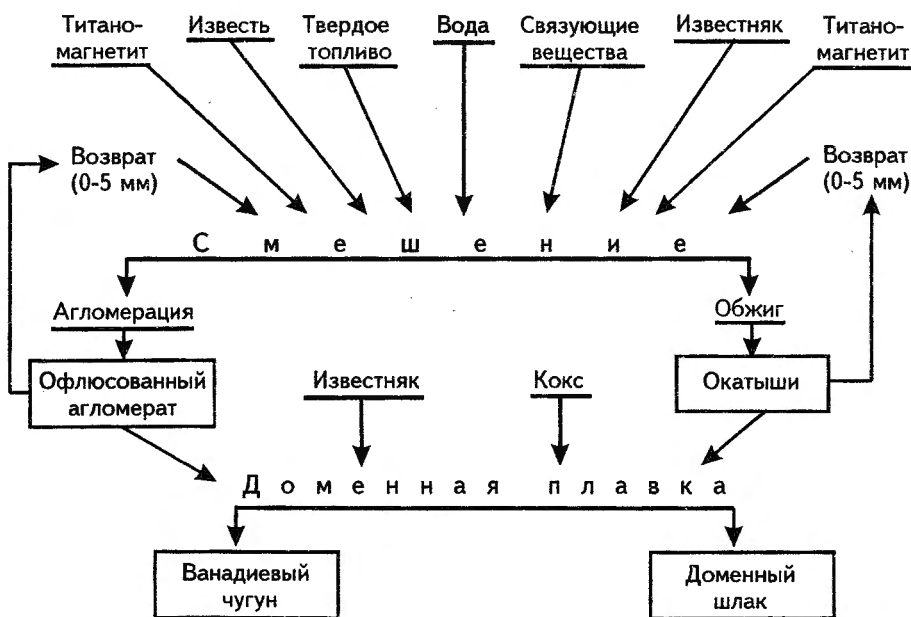


Рис. 1. Принципиальная схема переработки
титаномагнетитового концентрата на НТМК [8,10,39]

Для титаномагнетитов качканарского типа, содержащих до 4-5% TiO_2 , в России разработан и освоен промышленностью метод доменной плавки на Чусовском металлургическом заводе

(ЧМЗ) и Нижне-Тагильском металлургическом комбинате (НТМК) (рис. 1).

В технологическом процессе доменной плавки качканарских титаномагнетитов получают ванадиевые чугуны и титанистые шлаки. Выплавка ванадиевого чугуна из титаномагнетитов вследствие значительных содержаний оксида титана, CaO и кремнезема отличается от обычной доменной плавки железорудных концентратов образованием титанистых шлаков, характеризующихся специфическими свойствами — высокой кристаллизационной способностью и тугоплавкостью.

Сложности, возникающие с получением ванадиевых чугунов, металлургии объясняют восстановлением оксидов титана через образование промежуточных соединений в ряду $\text{TiO}_2 \rightarrow \text{Ti}_4\text{O}_7 \rightarrow \text{Ti}_3\text{O}_5 \rightarrow \text{Ti}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiO}_2 \rightarrow \text{TiO} \rightarrow \text{Ti}$, развитием карбидо- и греналеобразования, что в конечном итоге повышает тугоплавкость шлаков [32,46]. Высокие технико-экономические показатели работы доменных печей достигаются как за счет оптимизации технологии ведения процесса (создание эффективного теплообмена между газом и шихтовыми материалами, расходом воздуха и кислорода, кокса, температурой дутья, отношением природного газа к дутью и др.), совершенствования работы печей, так и за счет специальной подготовки шихты, которая заключается в получении агломерата и окатышей, характеризующихся достаточно стабильным составом и свойствами (табл. 15).

Уже на стадии подготовки шихты в ней протекают окислительные процессы и отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{FeO}$ по сравнению с исходным титаномагнетитом (где оно равно 2,11) в агломерате увеличивается в 2,2 раза, а в окатышах — в 10-20 раз.

Применение агломерата и окатышей в составе шихты, поступающей на доменную плавку, улучшает газопроницаемость шихтовых материалов по высоте и сечению доменной печи, обеспечивает эффективный теплообмен между газом и шахтовым материалом и восстановление оксидов железа.

Усовершенствование верхней части доменных печей (работы 1983-1990 гг.) и заплечиков улучшило ровность схода шихты и работу горна при повышенной форсировке плавки дутьем [26,38]. Освоена плавка передельного чугуна на печи объемом 2700 м^3 с использованием до 40% неофлюсованных окатышей Качканарского ГОКа. После полугодовой кампании производства ванадиевого чугуна отпала необходимость перевода доменной

печи объемом 1719 м³ на плавку местного сырья для промывки горна. Производительность усовершенствованных доменных печей возросла на 5,2-13,0%, и снизился удельный расход кокса на 3,4-6,3%.

Таблица 15

**Характеристика агломерата и окатышей,
направляемых на доменную плавку НТМК [39]**

Компоненты	Агломерат	Окатыши	Титаномагнетитовый концентрат
V ₂ O ₅	0,52-0,56	0,53-0,57	0,66
SiO ₂	5,32-5,55	3,6-4,04	2,2-4,5
TiO ₂	2,44-2,64	2,32-2,6	2,58
Fe ₂ O ₃	63,75-66,2	80,1-82,1	61,91
FeO	13,51-14,06	1,83-3,86	27,11
CaO	6,82-7,1	4,0-4,96	0,84-2,8
MgO	-	-	2,52
MnO	-	-	0,23
Fe ₂ O ₃ :FeO	4,3-4,8	21,0-45,1	2,26
CaO:SiO ₂	1,27 ± 0,02	1,23 ± 0,1	0,5
Прочность, кг/окатыш	-	152 ± 13	-
Содержание фракций, %, (мм)	<1 (+50)	53-65 (+12)	
	7,4-16,6 (25-50)	29-44 (5-12)	
	21-32 (10-25)	3,2-6,0 (0-5)	
	38-50 (5-10)		
	14-20 (0-5)		

В результате освоения Качканарским ГОКом производства неофлюсованных окатышей, прочность их (по сравнению с офлюсованными) при восстановлении возросла вдвое, что также ведет к повышению производительности работы печей [27]. На Западно-Сибирском металлургическом комбинате с высоким эффектом освоена доменная плавка передельного чугуна с использованием 20% неофлюсованных окатышей Качканарского ГОКа. Увеличение их содержания в шихте повышает газопроницае-

мость столба плавильных материалов и степень использования химической энергии газового потока. Замена 5% офлюсованных окатышей неофлюсованными в количестве до 20% способствует увеличению производительности работы печей на 1,5%, сокращению удельного расхода кокса на 2,5% и снижению расхода ручной смеси на 4%. Потери чугуна со шлаком находились на низком уровне — 0,5%. Это позволило улучшить тепловое состояние горна и довести содержание кремния в чугуне с 0,67 до 0,57% и титана в чугуне — до 0,22%. Повышение основности шлака ($\text{CaO} + \text{MgO}$): SiO_2 с 1,24 до 1,28 способствовало снижению содержания серы в чугуне с 0,022 до 0,020%. Существенного снижения ее содержания достигли при использовании углерод-фтористо-щелочного флюса в количестве до 12 кг/т чугуна.

Конечными продуктами доменной плавки являются перелый ванадиевый чугун, содержащий (% мас.): C — 4,2; V — 0,55; Si — 0,32; Ti — 0,23; Mn — 0,40; P — 0,07; S — 0,04; Cr — 0,62 и титанистый шлак, содержащий (% мас.): SiO_2 — 28; Al_2O_3 — 16,4; TiO_2 — 14; CaO — 27; MgO — 13; MnO — 0,4; FeO — 0,50; V_2O_5 — 0,15; S — 0,52. Извлечение ванадия в чугун составляет 81-83%; выход шлака на НТМК равен 400 кг/т чугуна.

УралНИИчерметом предложены новые варианты бескоксовой схемы передела титаномагнетитов, основанные на получении металлизированных ванадийсодержащих окатышей и их использовании для выплавки низколегированных (до 0,3% V) сталей или для производства чистого по примесям ванадиевого электрочугуна с последующей одновременной выплавкой в конвертере природно-легированной ванадием стали и ванадиевого шлака [45].

Для титаномагнетитов, содержащих > 5-8% TiO_2 , плавка сырья возможна только в электропечах в связи с образованием более титанистых, чем в доменном процессе, тугоплавких шлаков, требующих более высоких температур для их выпуска. Можно осуществить плавку Пудожгорского титаномагнетитового концентрата по схеме "вращающаяся печь — электропечь" с получением ванадиевых чугунов и титановых шлаков [39]. Шлаки при бесфлюсовой плавке выпускаются при температуре 1520-1600°C, что обеспечивает нормальный режим работы электропечи. При бесфлюсовой плавке чугуны содержат, %: C — 4,00-5,02; Ti — 0,22-0,80; Si — 0,29-0,67; V — 0,36-1,02; образующиеся титановые шлаки: TiO_2 — 60,46-66,31; SiO_2 — 11,96-17,00; Al_2O_3 — 4,64-

7,20; FeO — 2,90-7,60; MgO — 0,80-2,10; MnO — до 0,95; V₂O₅ — 0,50-3,25. Установлено, что шлаки, содержащие более 60% TiO₂общ, вскрываются серной кислотой и могут быть использованы для производства пигментного диоксида титана. Однако для нормального производства пигментного диоксида титана необходимо наладить производство шлаков достаточно стабильного состава.

Электроплавка высокотитанистого титаномагнетита (до 18% TiO₂) внедрена и широко используется в ЮАР, где построен ряд металлургических заводов (Витбанк и др.). Сырье предварительно обжигается во вращающейся наклонной печи, а затем подвергается электроплавке. Получаемый ванадиевый чугун направляется на производство ванадиевых шлаков и стали. В ЮАР же получают феррованадий и натрован [64].

Получение ванадия из титаномагнетитового сырья

В настоящее время существуют два основных промышленных способа получения ванадия из титаномагнетитового сырья: пирометаллургический и гидрометаллургический. Первый из них на основе доменной плавки разработан для бедных по титану ($\leq 3\%$) и ванадию ($\geq 0,33\%$) уральских титаномагнетитов. По данной технологии выход конвертерного ванадиевого шлака составляет $\sim 3\%$, а извлечение ванадия в шлак $\sim 65\%$. Богатые по титану и ванадию титаномагнетиты ЮАР перерабатываются по двухстадийной схеме с получением богатых ванадиевых шлаков. Гидрометаллургический способ пригоден для переработки сырья, содержащего 1,5% V₂O₅. И хотя при этом достигается высокое извлечение ванадия ($\sim 85\%$), однако на выщелачивание поступает огромное количество сырья, что приводит к большим расходам щелочи, серной кислоты и воды.

Получаемые на разных металлургических комбинатах ванадиевые шлаки значительно отличаются по химическому и фазово-минералогическому составу, что обусловлено качеством и свойствами титаномагнетитового сырья и соответственно получаемых концентратов, а также различиями в технологии их переработки [8,10,11,39] (табл.16,17).

Таблица 16

Химический состав промышленных ванадиевых шлаков [11]

Страна (комбинат)	Способ выплавки	Компоненты, % мас.							
		Fe _{общ.}	V ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO
РФ (НТМК)	Верхнее кислородное дутье	26-32	16-24	7-10	15-18	2-4	1-3	1-3	7-10
РФ (ЧМЗ)	Продувка снизу воздухом, обогащенным кислородом	26-32	14-17	7-10	18-20	5-9	1-3	1-1,5	7-10
ЮАР	Продувка кислородом в виброковше	18-20	24-28	6-10	17	2-5	3-4	0,5-2	6-10
КНР	-	30-39	11-16	8-14	8-35	-	1,3	1-3	8-14

**Фазово-минералогическая характеристика
промышленных ванадиевых шлаков [II]**

Шлак комби- натов	Фазовый состав, % мас.					Сред- ний раз- мер шпине- лидов, мкм	Содер- жание ванадия в шпине- лиде, % мас.
	Шпине- лиды	Ортоме- тасили- каты	RO-фаза	Кристо- балит	Дисперс- ное же- лезо		
НТМК	40-60	30-40	2-10	1-2	1-3	20-30	20-35
ЧМЗ	30-40	30-40	-	5-10	2-5	8-15	15-25

Деванадация доменных передельных чугунов. Производство ванадиевых шлаков за счет деванадации чугунов — основной процесс, освоенный металлургической промышленностью СССР. Образующиеся при доменной плавке ванадиевые чугуны усредняются в миксерах и заливаются в конвертеры, куда в качестве окислителя добавляется железная окалина (или гематитовая руда), после чего осуществляется продувка металлического расплава воздухом (ЧМЗ) или кислородом (НТМК). Причем на НТМК осуществляется верхнее кислородное дутье, и шлаки содержат больше ванадия, но меньше хрома, чем на ЧМЗ, где продувку расплава проводят воздухом через донные фурмы.

Получение ванадиевых чугунов в процессе деванадации чугунов ведут в конвертерах емкостью до 160 т при температуре 1350-1400°C. Процесс шлакообразования протекает за счет окисления титана, кремния, ванадия, марганца и хрома со значительным выделением тепла, поэтому внешнего обогрева конвертеров не требуется.

Фазовый состав шлаков, помимо стекла, представлен: оливином, пироксеном, железными корольками, тонкодисперсным железом и шпинелидной фазой $a[(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})\text{O}] \cdot b[(\text{V}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3]$, в которой содержание ванадия составляет ~30%. Размер и количество шпинелидных фаз являются одним из основных параметров, определяющих полноту извлечения ванадия при вскрытии шлаков. В связи с этим придается очень большое значение таким факторам, как продолжительность продувки ванадиевых чугунов, продолжительность остывания (кристаллизации) шлака и др. В составе шлаков оксидные соединения составляют 70-90%, ко-

личество металлической фазы колеблется от 10 до 25%. Составы шлаков на ЧМЗ и НТМК значительно различаются (табл. 18).

Таблица 18
**Качество ванадиевых шлаков
 уральских металлургических
 комбинатов [10,39]**

Показатели	ЧМЗ	НТМК
Содержание компонентов, %:		
V ₂ O ₅	15,56	18,02 (до 22)
SiO ₂	18,40	19,30
Al ₂ O ₃	-	1,80
Cr ₂ O ₃	6,80	2,00-3,80
MnO	8,70	9,70
FeO	39,50	41,70
CaO	1,10	2,10
MgO	-	3,20
P	0,05	0,03-0,08
Выход ванадиевого шлака на 1 т чугуна, кг/т	74,1	41,5
Плотность шлака, кг/м ³	-	3800

Несмотря на то, что титаномagnetитовое сырье является основным источником ванадиевого сырья в РФ, сквозное извлечение ванадия из уральских титаномagnetитов невысокое и достигает 24-28%, что связано с технологическими потерями в существующей пирометаллургической схеме его извлечения (потери со шлаками на стадии получения пятиокси ванадия, а также использование титаномagnetитового сырья без извлечения ванадия, когда оно переплавляется только как железорудное сырье).

Получение высокованадиевых шлаков из качканарских титаномagnetитов является важной задачей металлургии. Указывается, что при деванадации доменных чугунов НТМК, содержащих

< 0,1 Si, < 0,1 Ti могут быть получены шлаки, содержащие 25-30% V₂O₅, что сопоставимо со шлаками ЮАР (Шаврин С.В., 1976). Еще более богатые ванадием продукты были получены в опытных условиях из железорудного сырья Чинейского месторождения [11,39] (Дерябин Ю.А. и др., 1987). Продувке кислородом подвергался полученный из чинейских металлизированных окатышей ванадиевый электрочугун, содержащий (% мас.): С — 2,1-3,6; V — 0,7-1,1; Si — 0,05-0,17; Ti — 0,02-0,16; Mn — 0,18-0,26. Опытные образцы шлаков содержали (% мас.): V₂O₅ — 29,1-42,4; CaO — 0,07-1,91; MnO — 4,8-9,2; Cr₂O₃ — 4,9-11,3; Fe_{общ.} — 29,0-40,5. Количество шпинелидов в шлаках 75-85, ортосиликатов — 5-20, стекла 5-10%. Возможности получения столь богатых по ва-

надию шлаков ставят Чинейское месторождение в разряд очень перспективных.

Гидрометаллургический способ извлечения ванадия из титаномагнетитовых концентратов. Данный способ был освоен на металлургических заводах Финляндии, где перерабатывались концентраты, содержащие более 1,5% V_2O_5 . В РФ этот метод не применяется вследствие более низкого содержания V_2O_5 в уральских титаномагнетитах, идущих на переработку. Согласно принципиальной технологической схеме (рис. 2), титаномагнетитовый концентрат крупностью -0,1 мм смешивается с содой, подвергается окомкованию в барабанах и окислительному обжигу в

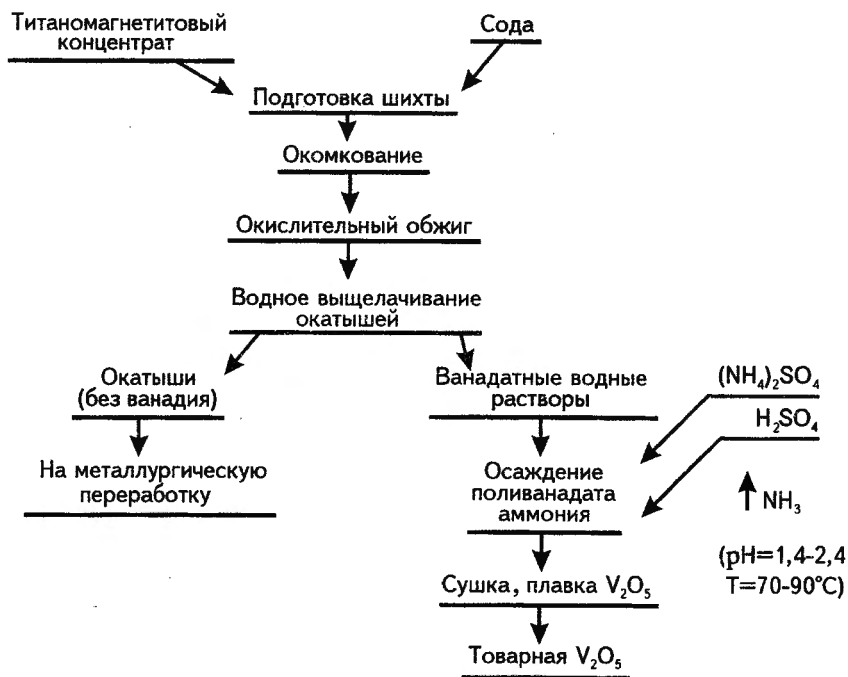


Рис. 2. Принципиальная гидрометаллургическая схема извлечения ванадия из титаномагнетитового сырья [10,39]

шахтных печах при температуре 1200-1300°C в течение 15 ч [10,39]. Окатыши, в которых ванадий на 85% находится в водора-

створимой форме, выщелачиваются водой в колоннах высотой 15 м и диаметром 2,5 м при температуре 75-95°C в течение 48 ч (всего проводится 16 циклов выщелачивания), после чего растворы, содержащие 65 г/л V_2O_5 , после соответствующей очистки от взвесей и кремнезема, подаются в реакторы, где обрабатываются серной кислотой и сульфатом аммония. Осадок поливанадата аммония $(NH_4)_4 H_2V_{10}O_{28}$ отделяется на рамных фильтрах от маточного раствора, сушится, разлагается и плавится в камерной печи при температуре 1000°C. Ванадиевые продукты содержат 93-99% V_2O_5 . Окатыши после выщелачивания содержат, %: $Fe_{общ}$ — 62; SiO_2 — 2,8; TiO_2 — 6,7; CaO — 1,35; Al_2O_3 — 1,1; MgO — 0,48; Cr_2O_3 — 0,03; Na_2O — 0,60; K_2O — 0,02; MnO — 0,23; V_2O_5 — 0,30; P_2O_5 — 0,005; S — 0,01. Степень извлечения водорастворимых солей ванадия высокая и достигает 97%.

Согласно исследованиям [39], из железорудных концентратов Волковского месторождения, содержащих до 1,3% V_2O_5 , 61,8% $Fe_{общ}$ и 2,1% SiO_2 с помощью гидрометаллургического способа возможно 87%-е извлечение ванадия в водный раствор.

Прямое легирование стали ванадием. Помимо описанных способов извлечения ванадия из сырья с получением ванадиевых продуктов существует технология использования качканарских титаномагнетитов, разработанная УралНИИчерметом, предусматривающая металлизацию железорудных окатышей в шахтных печах с получением ванадийсодержащего губчатого железа и последующим его использованием в электропечах для прямого легирования стали. Технология прошла стадию промышленных испытаний на ряде предприятий черной металлургии (Череповецкий и Челябинский металлургические комбинаты и др.). Степень усвоения ванадия сталью 85% [39].

Извлечение ванадия из конвертерных шлаков. Основными операциями переработки конвертерных шлаков являются: подготовка шлаков к обжигу с содой, окислительный обжиг, выщелачивание солей ванадия из окатышей, осаждение концентрата V_2O_5 или ванадата аммония, сушка — плавка пятиоксида ванадия [8,10]. Установлено, что лучше всего вскрываются шлаки, содержащие (%): V_2O_5 — 16; CaO — 0,8-1,2; SiO_2 — 24; металловключений Fe (в том числе 2% дисперсного) — 8-12; MnO — < 8; размер зерен шпинелидов должен быть 20-50 мкм.

Ванадиевые шлаки (кусок — 200 мм) измельчаются в несколько стадий до порошка с размером частичек — 0,1 мм и не-

сколько раз подвергаются магнитной сепарации для очистки шлаков от частичек металлического железа, так чтобы остаточное содержание дисперсного железа в шлаке не превышало 1,5-2,0%.

Измельченные и очищенные от железных королек шлаки гранулируют с кальцинированной содой (гранулы 2-4 мм) и направляют на окислительный обжиг. В процессе обжига в присутствии соды при температуре 700-800°C происходит окисление низших оксидов ванадия, марганца и железа в высшие оксиды, окисляется тонкодисперсное железо, перекристаллизуются силикатные фазы. При этом образуются водорастворимые и кислоторастворимые соли ванадия. В то же время, если ванадат натрия почти целиком растворяется в воде, то ванадаты кальция менее растворимы (кроме того, на стадии сернокислотной обработки растворов происходит забивание фильтроткани гипсом). Образование ванадатов марганца вызывает уменьшение скорости фильтрации щелочных пульп, а высокое содержание кремнезема в шлаке ухудшает переход ванадия в водорастворимую форму вследствие застекловывания шихты. Повышенное содержание в шихте тонкодисперсного железа (>2%) требует дополнительного расхода кислорода при окислении, что приводит к местным перегревам шихты, ее спеканию и оплавлению. Поэтому для достижения наибольшей полноты вскрытия шлака, т.е. перевода ванадия в растворимую форму (~90%), процесс обжига осуществляется при температуре 750-820°C при постоянном перемешивании в течение 3-4 ч; концентрация кислорода в газе поддерживается не ниже 8-10%об.

Гранулы, подвергнутые окислительному обжигу, поступают на трехстадийное выщелачивание. Еще не остывшие гранулы с температурой около 600°C подаются в барабанный холодильник, где орошаются водой и измельчаются с помощью металлических катков до размера частичек -0,15 мм. Пульпа с температурой 70-80°C и Т:Ж = 1:5 через систему насосов и мешалок выщелачивается, после чего кек отделяется от продуктивного раствора на вакуум-фильтрах. Кеки с влажностью 20% подвергаются выщелачиванию обратными растворами, содержащими 5 г/л V_2O_5 и 40-50 г/л серной кислоты, для доизвлечения ванадия и уменьшения его потерь с твердыми шлаками (отходами). Пульпа интенсивно перемешивается в реакторах с мешалками при температуре 20-30°C и Т:Ж = 1:3. После фильтрации кеки вновь подвергаются выщелачиванию слабым раствором 5-6%-ой серной кислоты.

Отфильтрованный твердый остаток направляется на отвалы, а кислый фильтрат возвращается на первую стадию кислотной обработки шлаков. Отвальные шламы содержат в своем составе, %: V_2O_5 — 1-2; Fe_2O_3 — 42-46; SiO_2 — 18-22; MnO — 6-9; TiO_2 — 6-7; Cr_2O_3 — 3-5; CaO — 0,8-1,5; MgO — 1,0-1,8; Al_2O_3 — 2-2,5; Na_2O — 1-1,5; SO_4^{2-} — 2-2,5; P_2O_5 — 0,06.

На стадии водного выщелачивания, где извлекается 60-65% ванадия, растворы содержат 18-25 г/л V_2O_5 ; на сернокислотной стадии доизвлекается ~30% ванадия, и растворы содержат 13-16 г/л V_2O_5 .

Водные и кислые продукционные растворы смешивают, усредняют, доводят до $pH = 1,5-2,0$ и выдерживают при температуре 85-95°C. Данные параметры являются оптимальными для выпадения ванадиевого осадка. Осадок, содержащий ~60% воды, сушат, разлагают и плавят в отражательной печи, обогреваемой мазутом, при температуре 950-1100°C. Расплав через боковую летку выпускается на охлаждаемый грануляционный стол, откуда закаленный плав в виде пластинок толщиной 2-3 мм загружается в контейнеры. Плавленный пентаоксид ванадия (технический продукт) содержит, %: V_2O_5 — 80-85 (в том числе 1,2-2 V_2O_4); Na_2O — 3-5; FeO — 5-7; CaO — 1-2; MgO — 0,4-1,0; SiO_2 — 1,2-2,8; Al_2O_3 — 0,6-1,2; Cr_2O_3 — 0,2-0,5; MnO — 3-5; TiO_2 — 0,5-1,0; P_2O_5 — 0,05-0,09.

Недостатком данной технологии является невысокий выход водорастворимых соединений ванадия, низкое качество получаемого технического продукта, в котором 15-20% приходится на долю оксидов железа, марганца, титана, хрома, алюминия, кальция, магния, щелочей, кремния и серы, а также большое количество сточных вод, содержащих ~0,3 г/л V_2O_5 , сульфаты марганца, железа, титана, хрома, магния и других металлов. На каждую 1 т V_2O_5 приходится 60-70 м³ стоков, содержащих 1,1-1,2 т сульфатов. В некоторых случаях ставится вопрос об извлечении хрома из промстоков с последующей их упаркой и кристаллизацией сульфата натрия [8].

На АО "Тулачермет" после обжига шлаков с известняком шихта подвергается выщелачиванию в реакторах с мешалками слабым раствором серной кислоты при $pH = 2,7-3,0$ и температуре 35-60°C, фильтрации на фильтр-прессах и промывке водой. Промытые шламы вновь выщелачиваются 2-3%-ой серной кис-

лотой при 20-30°C и после промывки водой направляются в шламонакопитель, где они складываются. Осаждение ванадия из водно-кислотных растворов осуществляется при $\text{pH} = 1,5-2,0$ и температуре 80-90°C. После сушки и плавки осадка (60% влажности) продукт содержит 90-92% V_2O_5 и 2,5-3,5% Mn и используется для производства феррованадия.

Накопившийся в количестве около 800 тыс.т шлам (АО "Тулачермет") представляет серьезную угрозу водной среде, вследствие загрязнения водоемов токсичными элементами, и воздушному бассейну из-за пыления терриконов. Проблема утилизации ванадиевых шламов, несмотря на большое количество научно-исследовательских работ в этой области до сих пор остается нерешенной. Сложность с утилизацией шламов, содержащих оксиды железа, хрома, ванадия, магния, марганца, кремния создается еще и за счет повышенного содержания в них различных сульфатных соединений.

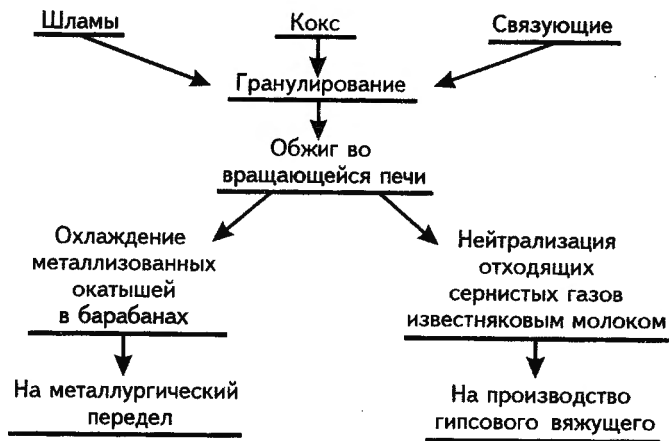


Рис. 3. Принципиальная схема утилизации ванадиевых шламов

В этой связи представляется достаточно рациональным обжиг шихты во вращающихся печах с получением металлизированных окатышей и удалением сернистых газов с улавливанием в виде гипсового вяжущего. Принципиальная схема утилизации

ванадиевых шламов представлена на рис. 3 (Делицын Л.М. и др., 1990-1991).

Экспериментальные исследования показали принципиальную возможность осуществления данного процесса. При этом кокс расходуется на восстановление железа до металлического состояния и разложение сульфата кальция и др. Примеси оксида кремния, алюминия и других значительно ускоряют разложение сульфата кальция. Металлизированные окатыши обладают большой прочностью и содержат железо, марганец, титан, хром, ванадий, кремнезем, кальций, магний в тех же соотношениях, которые были в шлаках. Такие окатыши могут быть использованы при плавке в доменных печах на ЧМЗ или НТМК. Сера в процессе обжига удаляется практически нацело в газовую фазу и может быть нейтрализована известковым молоком с получением гипсового вяжущего. По данной схеме используются все компоненты, и она снимает проблему накопления и хранения токсичных отходов ванадиевого производства.

Для улучшения технологических показателей извлечения ванадия из шлаков было предложено несколько новых способов. Окислительный обжиг шлаков рекомендуется осуществлять с добавлением в шихту оксидов и карбонатов кальция и магния при температуре 800-950°C. После чего выщелачивание должно проводиться в автоклавных условиях при 100-170°C в течение 1-3 ч при перемешивании карбонатным раствором аммиака или натрия. Осаждение ванадиевых соединений происходит путем кристаллизации в процессе охлаждения из раствора, отделенного от твердого остатка [47].

Считается [49], что окислительный обжиг необходимо проводить в две стадии. Вначале ванадиевый шлак обжигается без добавок при 520-720°C в течение 2-3 ч, затем охлаждается до 500-510°C и обжигается второй раз с добавкой 4-5% соды при температуре 580-620°C, после чего направляется на выщелачивание и дальнейшие переделы.

Помимо традиционных методов предлагается окислительный обжиг вести в присутствии смеси нитрата и нитрита натрия [50] или вносить добавку 1,5% фторида кальция [12].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАНАДИЕВЫХ ШЛАКОВ

С целью извлечения из бедного по содержанию титана (3% TiO_2) титаномагнетитового сырья не только ванадия, но и титана были выполнены экспериментальные исследования по вскрытию титанованадиевых шлаков, полученных из титаномагнетитовых концентратов месторождения Большой Сейим [19,44]. Шлаки нарабатывались методом бесфлюсовой и флюсовой плавки в электропечах при отсутствии кокса (табл. 19). В качестве флюсов использовались щелочные добавки.

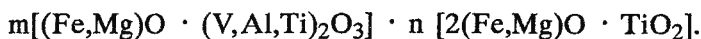
Таблица 19

Состав титанованадиевых шлаков,
полученных из титаномагнетитовых концентратов
месторождения Большой Сейим, %мас. [19,44]

Компоненты	Титаномагнетитовый концентрат	Шлаки		
		№ 1	№ 2	№ 3
V_2O_5	0,89	5,75	6,10	7,40
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	64,8	7,8	8,4	13,0
TiO_2 общ	3,0	27,6	26,7	24,1
Ti_2O_3	-	1,60	1,24	0,29
SiO_2	1,7	15,6	15,1	13,7
Al_2O_3	2,3	21,2	20,5	18,5
CaO	0,3	2,8	2,7	2,4
MgO	0,9	8,3	8,0	7,2
MnO	0,04	0,40	0,35	0,30
Na_2O	-	8,4	10,8	12,5
P	0,02	-	-	-
S	0,09	-	-	-
$(\text{CaO} + \text{MgO})$	0,70	0,70	0,70	0,70
SiO_2				

В отличие от шлаков, получаемых при деванадации доменных чугунов в данном случае получают щелочные шлаки, содержащие в 2,5-3 раза меньше ванадия, но в 5-6 раз больше ти-

тана и в 1,2-1,5 раз больше алюминия. Фазовый состав шлаков №№ 1 и 2 представлен ванадистым аносовитом $a[(V,Ti,Al)_2O_3 \cdot TiO_2] \cdot b[(Mg,Fe)O \cdot 2TiO_2]$ и щелочным алюмосиликатным стеклом. В более щелочной среде (шлак № 3) образуется, кроме того, сложный ванадиевый шпинелид:



Шлаки указанного состава после окислительного обжига при температуре 850-950°C в течение 1 ч выщелачивались водой при температуре 80-90°C. Извлечение ванадия из спеков при

этом составляет 80-85% (максимально 89,5%) при содержании V_2O_5 в водной вытяжке 20-25 г/л. Обжиг шлаков при температуре выше 950°C приводит к образованию нерастворимых в воде ванадиевых бронз примерного состава $Na_xV_2O_5$ и соответственно потерям ванадия со шламами. Доизвлечение ванадия выщелачиванием спеков 7%-ой серной кислотой невелико и не превышает всего 3%.

После выщелачивания ванадия содержание диоксида титана в спеках увеличивается до 30% и может быть повышено еще до ~92% за счет химического обогащения солянокислыми растворами и последующего обескременивания растворов. Такой продукт (искусственный рутил) уже может служить

сырьем для хлорной технологии производства металлического титана или пигментного диоксида титана.

Таблица 20
Состав титаномагнетитовых концентратов, подвергнутых восстановлению водородом [13, 54]

Компоненты, % мас.	Месторождения	
	Куранахское	Большой Сейим
V_2O_5	0,87	0,73
SiO_2	0,24	1,93
TiO_2	7,45	3,0
Fe_2O_3	54,17	61,3
Al_2O_3	3,0	2,41
Cr_2O_3	0,51	0,01
FeO	31,76	28,1
CaO	0,08	0,34
MgO	0,74	1,52
MnO	0,25	0,04
Na_2O	0,20	-
K_2O	0,23	-
P	0,005	0,02
S	0,002	0,09

Ряд работ посвящен разработке бесфлюсовой технологии получения в электропечах низколегированной ванадием стали (0,05-0,15% V) и титанованадиевых шлаков (30-60% TiO_2 , 3-8% V_2O_5), пригодных для последующего извлечения ванадия, титана и других компонентов [43]. Очень серьезным вопросом в данном случае является понимание процессов, происходящих на стадии

Таблица 21

Фазовый состав продуктов восстановления титаномагнетитовых концентратов водородом [13,54]

Температура, °С	Титаномагнетитовый концентрат Куранахского месторождения (без добавок соды)	Титаномагнетитовый концентрат месторождения Большой Сейим	
		без добавок соды	с добавками соды (1,5-2,5%)
700-800	Fe мет., α -оксид, рутил, шпинель	Fe мет., рутил, шпинель	-
900	Fe мет., фазы магнели, шпинель, ильменит	Fe мет., рутил, шпинель	Fe мет., титановые бронзы (Na_xTiO_2) перовскит, шпинель, MgO , Mg_2TiO_4 , $Na_2Ti_2O_5$, неопределенные фазы
1000	Fe мет., фазы магнели, шпинель	-	-
1100	Fe мет., M_3O_5 , фазы магнели, шпинель	Fe мет., M_3O_5 , V_2O_5 , шпинель, ильменит, кристобалит, авгит, гейкилит	Fe мет., шпинель, MgO , M_3O_5 , MgV_2O_4 , Na_2OTiO_3 , $Na_2Ti_2O_5$, перовскит, неопределенные фазы
1200-1250	Fe мет., M_3O_5 , шпинель	-	-

предварительной металлизации сырья газообразными восстановителями. В этой связи были детально проанализированы механизм поведения оксидов железа, титана, ванадия, хрома, марганца, алюминия, кремния, кальция, магния и щелочей в ходе восстановления титаномагнетитовых концентратов водородом в ин-

тервале температур 700-1250°C [13,54]. Состав исходных концентратов отличается друг от друга и представлен в табл. 20.

По фазовому составу титаномагнетит Куранахского месторождения представляет собой твердый раствор магнетита со структурой распада с выделением ульвошпинели Fe_2TiO_4 и шпинели MgAl_2O_4 . Титаномагнетит месторождения Большой Сейим представлен твердым раствором ульвошпинели $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{TiO}_4$ в магнетите и содержит включения ильменита $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ (~2%), шпинели MgAl_2O_4 (~0,5%), гематита Fe_2O_3 (~10%) и диаспора $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (~1,5%).

Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о сложном механизме восстановительных реакций, протекающих в многокомпонентной гетерогенной системе. При этом небольшие добавки соды (1,5-2,5%) не только ускоряют ход восстановления титаномагнетита, но и полностью изменяют фазовый состав продуктов твердых растворов, возникающих на разных температурных стадиях процесса. Совершенно очевидно, что кроме температурного фактора, определяющее значение в данном случае играет фазовый состав исходного минерального сырья (табл. 21).

Сделана попытка определить продукты углетермического восстановления титаномагнетита с добавками борных соединений до температуры 1300°C [1], для чего был использован титаномагнетитовый концентрат одной из россыпей островов курильской гряды, содержащий (% мас.): Fe_2O_3 — 46,7; FeO — 35,0; TiO_2 — 8,4; Al_2O_3 — 3,2; SiO_2 — 3,2; MnO — 0,05; CaO — 0,3; Na_2O — 0,54; K_2O — 0,10; SO_3 — 0,01; P_2O_5 — 0,70; CO_2 — < 0,05 и борный (дадолитовый концентрат), содержащий B_2O_3 — 16,5-17,5; SiO_2 — 32-34; CaO — 36-39; Al_2O_3 — 0,1-0,4. В процессе термообработки образовывался металлический слиток и пористый шлак, в которых обнаружены: α -железо, бориды и борокарбиды железа: FeB , Fe_2B , Fe_3C , $\text{Fe}_3(\text{C}_{1-x}\text{B}_x)$; $\text{Fe}_3(\text{Si}, \text{B})$, FeCSi , примесь TiB . Многие вопросы остались невыясненными, и работа требует продолжения.

В связи с возможностью получения дешевого титаномагнетитового концентрата из отходов флотационного обогащения апатитонепелиновых руд Хибинских месторождений регулярно появляются работы, касающиеся перспектив его переработки как металлургическими [20,35,40], так и чисто химическими методами [36].

Хибинский титаномагнетит представлен твердым раствором магнетита, ильменита и ульвошпинели, он беден ванадием, но содержит повышенное количество титана и марганца (Делицын Л.М., 1985) (табл. 22).

Таблица 22

**Средний состав титаномагнетита*
хибинских апатитонепелиновых месторождений**

Параметры	V ₂ O ₅	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO
Среднее арифметическое, % мас.	0,33	15,80	42,30	39,48	0,71	0,50	2,12
Стандартное отклонение	0,17	1,75	2,81	1,88	0,77	0,37	0,82
Коэффициент вариации, %	52	11	7	5	108	74	37

* Титаномагнетитовые концентраты Хибин всегда загрязнены примесями апатита, нефелина, пироксенов, сфена, полевого шпата, лепидомелана.

Бесфлюсовой восстановительной плавкой из него возможно получение низкотитановых шлаков, состоящих из аносовита

Таблица 23

**Состав исходного и рутилизованного шлаков
и искусственного рутила [40]**

Продукт	TiO ₂ общ	Ti ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Аносовитовый шлак	65,6	22,5	-	3,1	8,3	7,3	5,3	5,3	7,3	-
Рутилизованный шлак	62,4	-	1,6	-	6,6	5,7	3,8	2,7	4,5	13,0
Рутиловый концентрат	94,0	-	0,98	-	1,07	0,64	0,88	-	0,75	-

и стекла и содержащих (%): TiO₂общ — 55-65; FeO — 10-12; MnO — 6-8; MgO — 5,3-5,5; SiO₂ — до 8; CaO — до 5,5; V₂O₅ — 0,2. Титан в четырех- и трехвалентной форме концентрируется в кристаллах

аносовита, представленного твердым раствором сложного состава: $n[(\text{Fe}, \text{Ti}, \text{Al})_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2] \cdot m[(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{O} \cdot 2\text{TiO}_2] \cdot p\text{TiO}_2$. Размер кристалликов аносовита, образующихся при охлаждении шлаков, 15-20 мкм, и они не могут быть выделены в высококачественный титановый концентрат. Для их укрупнения шлаки подвергались окислению кислородом воздуха в присутствии солевых добавок. Установлено, что после термообработки при 1400°C в течение 4-8 ч с добавкой TiP_2O_7 перекристаллизованный шлак состоял из прозрачных кристаллов рутила размером 0,1-0,2 мм и стекла, в котором накапливаются примесные компоненты шлака. Анализ подтверждает, что в процессе окислительного обжига титан полностью переходит в четырех-, а железо — в трехвалентное состояние (табл. 23). Из измельченного до класса крупности $-0,1+0,074$ мм рутилированного шлака получен концентрат искусственного рутила, пригодный для производства пигментного диоксида титана по хлорной технологии.

НОВЫЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТА

Сотрудниками КНЦ РАН изучена возможность сернокислотной переработки хибинского титаномagnetитового концентрата [36]. Доочищенный с помощью 2%-ой азотной кислоты концентрат содержит 98,9% титаномagnetита; его состав (% мас.): TiO_2 — 19,5; Fe_2O_3 — 37,6; FeO — 39,1; MnO — 1,76; SiO_2 — 1,10; V_2O_5 — 0,56. Показано, что после восьмичасового кипячения в 20%-ой серной кислоте (расход H_2SO_4 2 т/т) в раствор переходит 87% Fe_2O_3 и 20-21% TiO_2 ; ~80% диоксида титана остается в нерастворимом остатке. Поведение ванадия, марганца и других компонентов, их распределение между жидкой и твердой фазами остались невыясненными.

Выполнены, кроме того, поисковые исследования по сернокислотному выщелачиванию ванадия непосредственно из титаномagnetитового концентрата без предварительного обжига или спекания [34]. В опытах был использован титаномagnetитовый концентрат, содержащий (% мас.): V_2O_5 — 0,83; Fe_2O_3 — 61,54; FeO — 26,11; SiO_2 — 2,94; TiO_2 — 2,14; MnO — 0,15; CaO — 2,07; MgO — 2,53; Cr_2O_3 — 0,10; влажность — 1,59. Показана возможность селективного извлечения ванадия растворами 10%-ой

серной кислоты с добавками окислителей при температуре 200°C и избыточном давлении 1 МПа. Извлечение ванадия в раствор может достигать 90-92,5% при общем вскрытии рудной составляющей 21-24%. Помимо ванадия в раствор частично переходит и железо.

Кроме кислотных методов предложен способ переработки титаномагнетитовых концентратов, содержащих ванадий, включающий шихтование с восстановителем и сульфидизатором, обжиг при температуре 1200-1300°C и магнитную сепарацию. При этом сульфидизатор вводят в шихту, в которой содержание серы 0,6-0,9% от массы концентрата [42].

Предложен способ переработки титаномагнетитов на диоксид титана с использованием фторидных соединений. Сырье подвергается предварительному обжигу в атмосфере воздуха при температуре 700-750°C, после чего направляется в печь кипящего слоя, где осуществляется его нагревание при температуре 800°C в атмосфере тетрафторида кремния без доступа кислорода. Образующийся в результате реакции взаимодействия между TiO_2 и SiF_4 тетрафторид титана отгоняется в конденсатор, быстро охлаждается, конденсируется и очищается сублимацией. Четырехфтористый титан подвергается пирогидролизу с водяным паром с образованием диоксида титана и HF , который возвращается для производства SiF_4 из кремнезема. Оборудование для осуществления данного процесса изготавливается из сплавов на основе никеля [63].

В будущем не исключено дальнейшее повышение комплексности использования титаномагнетитовых руд и отходов их перелоа за счет извлечения Mn , Al , Ga , Cr и др.

Получение скандия из силикатных хвостов обогащения. В процессе обогащения титаномагнетитовых руд качканарского типа скандий накапливается в силикатных хвостах (100-130 г/т). Его содержание в готовой продукции Качканарского ГОКа (концентрате, агломерате, окатышах) не превышает 19-24 г/т. В этой связи нельзя ожидать его заметной концентрации в продуктах или отходах доменного перелоа. Доменные шлаки Нижне-Тагильского металлургического комбината содержат не более 21 г/т Sc . Его мало в доменных пылях, шламе (табл. 24) и в ванадиевом чугуна (1 г/т). Не накапливается скандий и в конверторном шлаке ванадиевого производства (до 3 г/т Sc в ванадистых шлаках Ниж-

не-Тагильского комбината), исходным сырьем для которого является продукция Качканарского ГОКа.

Таблица 24
Содержание скандия
в доменном шлаке, пыли, шламе
и в конверторном шлаке НТМК [7]

Материал	Число проб	Содержание Sc*, г/т
Доменный шлак нижний	3	18,0-21,0 (19,3)
Доменный шлак верхний	3	19,0-21,0 (20,0)
Доменная пыль	3	4,5-5,1 (4,7)
Общий шлам	1	(11,0)
Конверторный шлак (ванадистый)	2	2,2-3,0 (2,6)

* В скобках - среднее значение.

С учетом приведенных данных (табл. 25) совершенно ясно, что наиболее надежным источником для получения скандия являются силикатные хвосты Качканарского ГОКа, в которых главная минеральная составляющая представлена диопсидом (до 150 г/т Sc). Ранее была предложена технологическая схема извлечения оксида скандия из силикатных хвостов рудных пироксенитов (Борисенко Л.Ф. и др., авторское свидетельство № 25573 от 03.02.63). По этой схеме первой операцией является вскрытие силикатных хвостов

сплавлением с щелочью. После перевода скандия в кислотный раствор производится карбонатная обработка. Получается промежуточный продукт, содержащий 4-7% Sc_2O_3 . Очистка этого продукта осуществляется экстракцией или сорбцией с последующим осаждением оксалата скандия с получением Sc_2O_3 99,9% чистоты. Однако этот способ относительно дорог.

В настоящее время разработан более совершенный способ получения скандия из хвостов мокрой магнитной сепарации (ММС) Качканарского ГОКа [7,17]. В 1992 г. ВНИИПИпромтехнологии завершил ТЭО строительства опытно-промышленного производства Sc_2O_3 в г.Качканаре. Первоначально предусматривается подготовка хвостов с целью получения наиболее обогащенного пироксенового продукта. Схема обогащения включает следующие операции: мелкое измельчение хвостов ММС в стержневых мельницах (до 0,1 мм); классификация измельченного продукта; две стадии ММС на барабанных магнитных сепараторах с высокой напряженностью магнитного поля; сгущение и обогащение на концентрационных столах; фильтрация железно-

Материал	Место взятия	Содержание Sc, г/т
Хвосты СМС	Обогатительная фабрика	100
Питание первой стадии (слив стержневой мельницы)	То же	110
Промпродукт первой стадии ММС	"-	86
Хвосты первой стадии ММС	"-	130
Слив шаровой мельницы	"-	42
Слив гидроциклонов	"-	55
Пески гидроциклонов	"-	43
Продукт второй стадии ММС	"-	32
Хвосты второй стадии ММС	"-	130
Титаномagnetитовый концентрат третьей стадии ММС	"-	24
Хвосты третьей стадии ММС	"-	120
Агломерат	Аглофабрика	23
Окатыши	Фабрика окатышей	19
Ильменитовый концентрат	Опытная установка ЦРПЛ	100

го, магнетитового и пироксенового концентратов. По этой схеме, помимо пироксенового, предусмотрено получение платинового, золотосульфидного и ильменитового концентратов [17].

Обогащенный пироксеновый концентрат подвергается технологической переработке по следующей схеме:

серно-кислотное выщелачивание подготовленного сырья;
отделение жидкой фазы от твердой после выщелачивания отстаиванием и фильтрацией;

промывка и концентрирование осадка с получением твердого силикатного продукта, направляемого для получения строительных материалов;

экстракция скандия из жидкой фазы смесями Д23ГФК, ТБФ, триалхилами с получением на стадии содово-щелочной рекстракции чернового концентрата скандия (ЧКС) с содержанием 2-5% мас. Sc;

последовательное выделение из рафинатов скандиевой экстракции концентратов титана и ванадия осаждением с последующей фильтрацией и сушкой (рис. 4).

ЧКС, получаемый при реэкстракции, подвергается вторичной гидрометаллургической переработке по схеме, включающей его растворение в азотной кислоте и последующую трехстадийную экстракционную переработку получающихся растворов смесью ТБФ и разнорадикального фосфиноксида с получением технического Sc_2O_3 марки ОС-99,0. Все продукты, получаемые из качканарских отходов, радиационно абсолютно чисты. Разработанный способ технологической переработки отходов обогащения титаномагнетитовых руд качканарского типа может существенно расширить комплексность их использования.

В другом способе извлечения скандия предлагается пироксенитовое сырье выщелачивать серной кислотой в присутствии соединений фтора с рециркуляцией полученных растворов [48].

Целесообразность использования титаномагнетитовых концентратов в качестве утяжелителей при бурении. В связи с тем, что основные эксплуатируемые месторождения барита в СНГ находятся на территории Казахстана и Грузии, для России существенное значение приобретает проблема замены утяжелителей, используемых при бурении. В последнее время выполнен комплекс научно-исследовательских и испытательных работ [16], позволивших рекомендовать использование в качестве утяжелителей титаномагнетитовый концентрат Качканарского ГОКа (патент РФ № 2071971). Получены утяжелители двух марок: ЖРК-1 (титаномагнетитовый концентрат) и ЖРК-2 (шламы производства концентрата). Они имеют довольно близкие параметры с природным баритом (табл. 26), но дешевле последнего в 2-3 раза. Тонина помола на шаровых, а далее стержневых мельницах, доводится до 0,071 мкм. Буровые растворы с утяжелителями ЖРК характеризуются: стабильной седиментационной устойчивостью в процессе утяжеления, сокращением времени утяжеления на 30-40%; расход глины при утяжелении ЖРК-1 и ЖРК-2 на 10-15% меньше, чем при утяжелении баритом. Утяжелители ЖРК прошли промышленные испытания, давшие положительные результаты на предприятиях "Ноябрьскнефтегаза", "Сургутнефтегаза", "Когалымнефтегаза", "Юганскнефтегаза" и "Нижневартовскнефтегаза". На производственных мощностях Качканарского ГОКа уже сейчас можно получить в год 30 тыс.т утяжели-

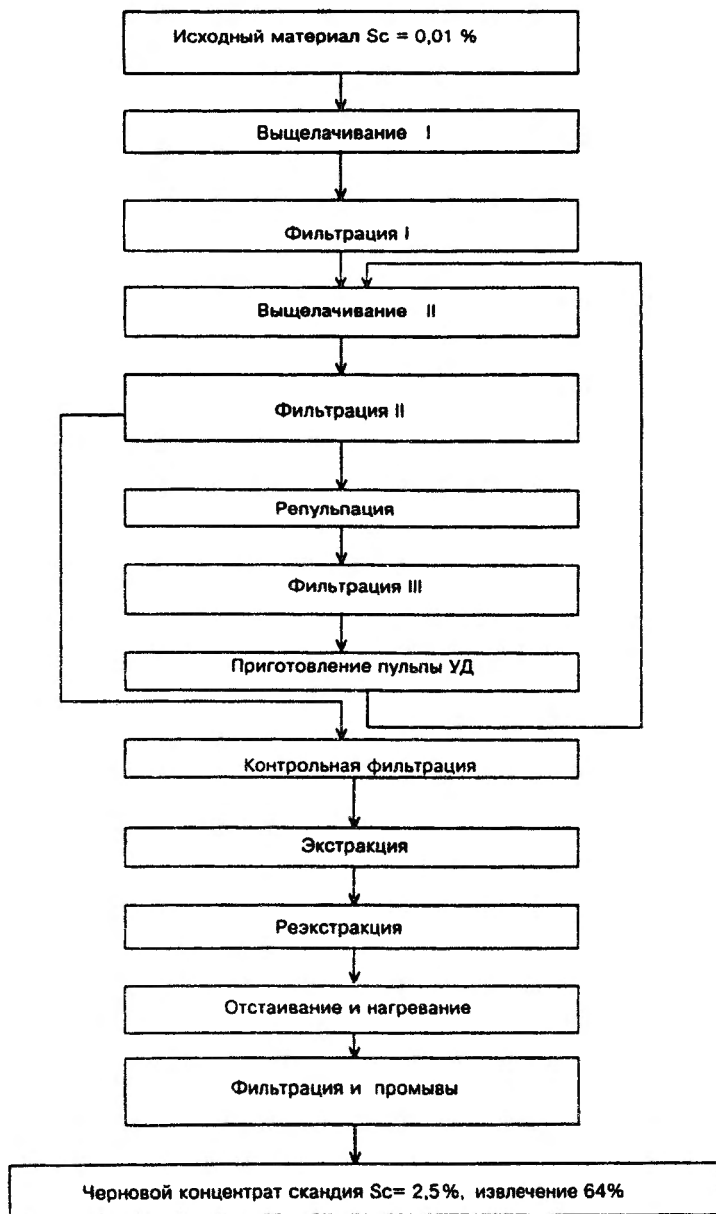


Рис. 4. Схема производства черного концентрата скандия из хвостов ММС Качканарского ГОКа [7]

Основные параметры утяжелителей [16]

Параметры	ЖРК-1	ЖРК-2	Барит (1 сорт)
Плотность, г/см ³	4,6-5,0	3,2-3,6	4,25
Утяжеляющая способность, г/см ³	2,25-2,42	1,6-1,8	2,1
Содержание водорастворимых твердых веществ, %	0,3	0,3	0,3
Стоимость 1 т без Н.Д.С. на 1.07.96 г., р.	420 тыс.	320 тыс.	900 тыс.
Влажность, %	1	1	1,5
Удельное электрическое сопротивление, Ом/м	3,0	3,6	2,9

теля ЖРК-1 и 50 тыс.т утяжелителя ЖРК-2 [16]. Будущее для утяжелителей ЖРК, полученных из титаномагнетитовых концентратов, весьма перспективно. На возможность использования рудных концентратов (ильменит-титаномагнетитовых) дальневосточных россыпей в качестве утяжелителей глинистых растворов при бурении глубоких нефтяных скважин на Сахалине и в прилегающих акваториях указывали В.А.Кутолин и А.А.Прусевич (1984). Достаточная стойкость титаномагнетита в поверхностных условиях повышает его ценность при использовании на буровых работах.

Заключение

Титаномагнетитовые руды во всем мире пользуются широким распространением. Их запасы значительны и исчисляются в РФ десятками миллиардов тонн. На отдельных месторождениях довольно часто встречаются запасы этих руд, превышающие 1 млрд т. Особенно много титаномагнетитовых месторождений на Урале и в Сибири, а также в целом ряде зарубежных стран (ЮАР, Китай, Австралия и др.). Титаномагнетитовые руды довольно хорошо обогащаются и получаемые из них рудные концентраты высокого качества. Это обстоятельство подтверждает многолетний опыт Качканарского ГОКа, где на протяжении длительного сро-

ка (более 30 лет) хорошо выдерживаются качественные показатели титаномагнетитового концентрата (60,5% $\text{Fe}_{\text{общ}}$; 26,6% FeO ; 0,58% V_2O_5).

Ценность титаномагнетитовых концентратов повышается постоянным присутствием примеси ванадия, количество которого на разных месторождениях колеблется в пределах 0,3-1%. В последнее время титаномагнетит стал главным сырьевым источником для получения ванадия. Вероятнее всего, что и в ближайшие годы этот минерал будет играть такую же роль. Однако, несмотря на большие запасы, широкое распространение титаномагнетитовых месторождений, опыт многолетнего их освоения, они до сих пор эксплуатируются достаточно ограниченно. Это объясняется тем, что для бедных титаномагнетитовых руд (Качканарское и т.п.), содержание TiO_2 в которых 2-4%, основным способом переработки является доменная плавка. Данным методом достаточно эффективно получают передельный ванадиевый чугун с последующим извлечением железа и ванадия. Такие же компоненты как титан, марганец, хром, алюминий полностью теряются с отходами производства.

Более богатые по содержанию TiO_2 ($\geq 5\%$) титаномагнетиты, как показывает зарубежный опыт, могут быть освоены методом двухстадийной переработки "вращающаяся печь — электропечь". Здесь также извлекаются в основном железо и ванадий. Проводятся различные НИР и ОКР по совершенствованию существующих технологий, по разработке новых способов переработки титаномагнетитов (кислотные — фторидные и др.), по утилизации шламовых отходов ванадиевого производства.

Совершенствование и удешевление способов передела титаномагнетитовых концентратов сможет привести к их более широкой эксплуатации во всем мире. В пределах РФ целый ряд перспективных крупных титаномагнетитовых месторождений (Пудожгорское, Чинейское, Харловское, Гремяха-Вырмес и многие другие), характеризующиеся повышенной титанистостью, нуждаются в применении специальных способов передела рудных концентратов.

Настоятельным требованием в современных условиях является вопрос существенного расширения комплексности использования титаномагнетитовых руд. В частности, помимо ванадия, особого внимания заслуживают содержащиеся в них титан и скандий. Постоянно присутствующий в рудных концентратах

тах титан (обычно 3-15%, редко больше) при плавке накапливается в шлаках и может быть оттуда извлечен. Для России это особенно важно, так как все крупные титановые месторождения, находящиеся сейчас в эксплуатации, остались в других странах СНГ. Большое значение в ближайшее время может приобрести скандий, который в составе пироксена накоплен в значительных количествах в хвостохранилище Качканарского ГОКа. В настоящее время разработан технологический способ передела пироксеновых хвостов с конечной целью извлечения скандия. Получены первые образцы оксида скандия, извлеченного из этих хвостов. Получены сплавы на основе алюминия, легированные скандием. Запасы скандия в титаномагнетитовых рудах и хвостах обогащения значительны.

Заслуживают внимания данные, полученные при экспериментальном использовании титаномагнетитового концентрата в качестве утяжелителя при бурении. Замена этим материалом более дорогого барита может существенно помочь при проведении буровых работ в пределах РФ. Это особенно важно, так как эксплуатация баритовых месторождений в основном производится за пределами РФ. В будущем не исключено расширение комплексности использования титаномагнетитовых руд за счет попутного извлечения Pt, Au, Mn, Al, Cu, Ga, Cr и др.

Литература

1. Аблесимов Н.Е., Виноградов В.В., Ефремова Е.Н. Исследование продуктов углеборотермического восстановления природного титаномагнетита // *Металлы*. — 1991. — № 2. — С.26-29.
2. Бартенев Н.С., Осокин А.С. Геологическое строение и главные типы комплексных руд Гремяхинского месторождения // *Структурный контроль оруденения в магматических и метаморфических комплексах Кольского п-ова*. — Апатиты, 1985. — С.31-41.
3. Борисенко Л.Ф. Скандий // *Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам*. — М.: Недра, 1989. — С.42-86.
4. Борисенко Л.Ф. Перспективные типы галлийсодержащих месторождений // *Литоология и полезн. ископ.* — 1993. — № 1. — С.35-48.
5. Борисенко Л.Ф. Сырьевые ресурсы ванадия в России // *Изв. вузов. Геология и разведка*. — М., 1996. — № 5. — С.55-61.

6. *Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М.* Перспективы освоения титанового сырья в России // Горная промышленность. — 1996. — № 4. — С.23-25.

7. *Борисенко Л.Ф., Еремин Н.Я., Усков Е.Д.* Роль скандия в повышении комплексного использования титаномагнетитовых руд // Горная промышленность. — 1997. — № 1. — С.51-55.

8. *Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П.* Минерально-сырьевые ресурсы ванадия и способы получения его соединений. — М.: ВИЭМС, 1991. — 63 с.

9. *Борисенко Л.Ф., Усков Е.Д.* Перспективы расширения комплексного использования титаномагнетитовых руд качканарского типа // Горный журнал. — 1993. — № 3. — С.11-13.

10. *Ванадий в черной металлургии / Н.П.Плякишев., Н.П.Слотвинский-Сидак, Ю.Л.Плинер и др.* — М.: Металлургия, 1983. — 192 с.

11. *Ванадиевые шлаки / Н.А.Ватолин, Ю.А.Дерябин, Л.А.Смирнов и др.* — М.: Наука, 1988. — 108 с.

12. *Ванадийсодержащий шлак.* Пат. 1836481А3 SU, МКИ⁵ C22 C35/00 / В.В.Петренев, Э.П.Криночкин, В.С.Лянцев и др.; Нижнетагильский металлург. комб. — №5014910/02; Заявл. 01.07.91; Оpubл. 23.08.93, Бюлл. № 31.

13. *Влияние соды на фазовые превращения при восстановлении титаномагнетитового концентрата водородом / Г.Б.Садыхов, Л.О.Наумова, В.А.Резниченко и др.* // Металлы. — 1994. — № 1. — С.9-16.

14. *Геологическая служба и развитие минерально-сырьевой базы / Под ред. А.И.Кривцова.* — М.: ЦНИГРИ, 1993. — 618 с.

15. *Еремин Н.Я., Сытых А.Н., Стиркин Н.Л.* Качканарский горно-обогатительный комбинат в условиях рыночных отношений // Горный журнал. — 1993. — № 9. — С.3-7.

16. *Еремин Н.Я., Полубабкин В.А.* Организация производства утяжелителей и бентопорошков на сырьевых базах Урала и Западной Сибири // Сб.докладов технического совещания представителей нефтегазовых предприятий Западной Сибири. — Тюмень: ТюменНИИгипрогаз. — 1996. — С.9-13.

17. *Еремин Н.Я., Усков Е.Д., Батуев М.А.* Организация производства редких металлов на базе отходов Качканарского горно-обогатительного комбината // Горный журнал. — 1993. — № 9-10. — С.9-10.

18. *Железорудные месторождения Сибири // Под ред. В.Н.Кузнецова.* — Новосибирск: Наука, 1981. — 238 с.

19. *Извлечение ванадия из титановых шлаков от плавки титаномагнетитов / Г.Б.Садыхов, В.А.Резниченко, И.А.Карязин и др.* // Металлы. — 1991. — № 2. — С.20-25.

20. *Изучение образования рутила при окислении низкотитанового шлака / И.М.Зеленова, В.А.Резниченко, А.Ю.Синадский и др.* // Металлы. — 1994. — № 5. — С.9-13.

21. *Казанцев М.М., Колотилов Л.И.* Платиноносные формации Казахстана // Геолого-генетические особенности месторождений цветных и черных металлов Казахстана. — Алма-Ата, 1990. — С.117-121.

22. *Комплексная геолого-экономическая оценка рудных месторождений* / А.М.Быбочкин, Л.З.Быховский, Ю.Ю.Воробьев и др. — М.: Недра, 1990. — 326 с.

23. *Комплексные апатитсодержащие месторождения габброидных формаций* / Р.М.Файзулин, Е.А.Панских, В.С.Тарасенко и др. // Геология рудн. месторождений. — 1990. — Т.32, № 1. — С.49-58.

24. *Криволицкая Н.А.* Сульфидная минерализация Чинейского массива // Геология рудн. месторождений. — 1986. — Т.28, № 6. — С.94-100.

25. *Малютин Е.И.* Сырьевая база горно-обогатительных комбинатов черной металлургии и дальнейшее направление геологоразведочных и научно-исследовательских работ по ее укреплению. Состояние и перспективы развития теории и практики обогащения руд и первичных металлов. — М., 1987. — С.108-112.

26. *Марсуверский Б.А.* Совершенствование профиля доменных печей для эффективной плавки сырья Качканарского ГОКа: Докл. 3 Междунар. конгресс доменщиков, Новокузнецк, июль 1995 // Металлург. — 1995. — № 10. — С.21.

27. *Марсуверский Б.А., Меламуд С.Г., Авцинов А.Ф.* Выплавка перелдального чугуна с использованием неофлюсованных окатышей Качканарского ГОКа: Докл. 3 Междунар. конгресс доменщиков, Новокузнецк, июль 1995 // Металлург. — 1995. — № 10. — С.18-19.

28. *Металлы платиновой группы и золота в рудных ультрамафитах Гусевгорского месторождения (Урал)* / Л.Ф.Борисенко, Л.М.Делицын, Н.Я.Еремин и др. // Прикладные аспекты геохим. исследований. — М.: ИМГРЭ, 1993. — С.69-78.

29. *Мельникова К.М., Белова Н.Б., Сярый Е.С.* Структурное положение и рудоносность некоторых массивов основных пород Северного Забайкалья // Изв. АН СССР, сер. геол. — 1988. — № 9. — С.87-99.

30. *Металлургические и технологические свойства титаномагнетитового концентрата из россыпей Татарского пролива* / В.Л.Резниченко, В.И.Соловьев, Н.И.Талмуд и др. — М.: Ин-т Металлургии АН СССР, 1987. — Деп. в ВИНТИИ 30.01.87. — № 724. — В87. — 11 с.

31. *Мурзин В.В., Волченко Ю.А., Сазонов В.Н.* Типоморфизм золотоносных минеральных ассоциаций в базит-гипербазитовых комплексах Урала. Ежегодн., 1988: Информ. матер. АН СССР. — Свердловск: Ин-т геол. и геох., 1989. — С.113-115.

32. *Особенности металлургической переработки железорудного сырья с повышенным содержанием TiO_2 , V_2O_5 в условиях АО "ММК"* / В.Г.Дружков, С.К.Сибегатуллин, В.А.Бигеев и др. // Развитие сырьевой базы пром. предприятий Урала: Межгоснауч.-техн. конф. (Магнитогорск), 16-20 мая 1995: Тез. докл. — Магнитогорск, 1995. — С.156-158.

33. *О составе, рудоносности и генезисе Геранского мангерит-анортозитового комплекса хребта Джугджур* / М.К.Суханов, А.Г.Тяжлов, Д.З.Журавлев и др. // Изв. АН СССР, сер. геол. — 1990. — № 8. — С.21-34.

34. *Палант А.А.* Прямое извлечение ванадия из титаномагнетитового концентрата // *Металлы*. — 1996. — № 5. — С.43-45.

35. *Перспективы* получения титанового сырья из титаномагнетитов Хибинского месторождения / *И.А.Карязин, И.М.Зеленова, В.А.Резниченко и др.* // *Цветн. металлы*. — 1992. — № 12. — С.36-39.

36. *Петров В.Б., Заонегина Ж.Ю., Бычкова Ю.Г.* Исследования по сернокислотной переработке титаномагнетитового концентрата Хибинского месторождения // *Технология минерального сырья и физ.-хим. исследования продуктов его переработки*. — Апатиты, 1994. — С.34-38.

37. *Проблемы* комплексного использования руд. 19-24 мая, 1996 // *Тез.докл. 2-й Междунар. симпозиум*. — СПб., 1996.

38. *Процесс* зарастания горна доменной печи тугоплавкими массами и меры его предупреждения / *Г.Г.Гаврилюк, С.Е.Лазуткин, Ю.А.Леконцев и др.* // *Междунар. конгр. доменщиков "Современ. опыт и перспективы доменного производства"*, Новокузнецк, 19-23 мая, 1995: *Тез.докл.* — Новокузнецк, 1995. — С.107-108.

39. *Резниченко В.А., Шабалин Л.И.* Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. — М.: Наука, 1986. — 294 с.

40. *Резниченко В.А., Зеленова И.М., Карязин И.А.* Получение искусственного рутила из низкотитанового шлака // *Цветн.металлы*. — 1993. — № 10. — С.39-40.

41. *Рудашевский Н.С.* Платиноиды ультрамафитовых формаций: минералогия, формационная специализация, генезис // В сб. *Петрол.-минерал. исслед. крист. пород*. — Л.: Наука, 1989. — С.46-58.

42. *Рюмин А.А.* Способ переработки титаномагнетитовых концентратов, содержащих ванадий: Пат. 2025524 Россия, МКИ⁵ С22 В34/22/Всес. нефт. н.-и. геол. ин-т. — № 5004378/02; Оpubл. 30.12.94, Бюлл.№ 24.

43. *Садыхов Г.Б., Наумова Л.О., Резниченко В.А.* Современное состояние и перспективы использования титаномагнетитов. Ин-т металлургии РАН. — М., 1992. — 11 с. — Библ.: 26 назв. — Рус. Деп в ВИНТИ 13.02.92. — № 865. — В92.

44. *Садыхов Г.Б., Резниченко В.А., Карязин И.А.* О научных основах комплексного использования титаномагнетитов // *Металлы*. — 1993. — № 1. — С.53-56.

45. *Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Дерябин Ю.А.* Перспективные процессы производства стали с использованием титаномагнетитового сырья // *Тр.2. Конгр. сталеплавильщиков, Липецк, 12-15 окт., 1993*. — М., 1994. — С.24-29.

46. *Совершенствование* технологии выплавки ванадиевого чугуна регулированием процессов восстановления оксидов титана / *Б.А.Марсуверский, В.С.Рудин, В.В.Филиппов и др.* // *Сталь*. — 1995. — № 1. — С.7-10.

47. *Способ* извлечения ванадия: Пат. 2055924 Россия МКИ⁶ С22 В34/26/Н.П.Слотвинский-Сидак, Т.И.Харлампиева, В.И.Потапов и др. Ин-т порошковой металлургии. — № 92014755/02. Заявл.28.12.92. Оpubл. 10.3.96, Бюлл. № 7.

48. Способ извлечения скандия из пироксенитового сырья: Пат. 2034074, Россия, МКИ⁶ С22 В59/00/Т.А.Смольная, И.П.Смирнов, В.В.Шаталов и др. ВНИИ хим.технол. — № 5042008/02; Заявл. 2.5.92; Оpubл. 30.4.95, Бюлл. № 12.
49. Способ переработки ванадиевых шлаков: Пат. 2016108 Россия, МКИ⁵ С22 В34/22/Ю.А.Харитонов, Л.С.Смирнов, И.Н.Губайдуллин и др. Научн.-эксперим. предприятие УралНИИчермет — № 4860189/02; Заявл. 22.5.90; Оpubл. 15.7.94, Бюлл. № 13.
50. Способ переработки ванадийсодержащих конвертерных шлаков: Пат. 2033448 Россия, МКИ⁵ С22 В34/22/С.А.Амирова, Н.Ф.Данилов, В.П.Кудряшов и др. Перм. техн. ун-т. — № 4875543/02; Заявл. 22.10.90; Оpubл. 20.4.95, Бюлл. № 11.
51. Справочник по рудам черных металлов для геологов / В.М.Григорьев, Л.Ф.Борисенко, Г.Г.Кравченко и др. — М.: Недра, 1985. — 288 с.
52. Технологическая минералогия железных руд // Ред. В.Н.Ревнивцев. — Л.: Наука, 1988. — 301 с.
53. Толстых Н.Д., Кривенко А.П. Формы концентрирования платиновой группы в сульфидных рудах Чинейского месторождения. Проблемы комплексного использования руд 15-24 мая, 1996 // Тез.докл. 2-й Междун.симпозиум. — СПб., 1996. — С.39.
54. Фазовые превращения при восстановлении титаномагнетита водородом / Г.Б.Садыхов, Л.О.Наумова, В.А.Резниченко и др. // Металлы. — 1992. — № 5. — С.20-30.
55. Фоминых В.Г. Титаномагнетитовые формации Урала // Сб. Рудоносн. и рудн. формации Урала. — Свердловск: Ин-т геол. и геохим., 1988. — С.139-148.
56. Химия, технология и применение ванадиевых соединений // Тез.докл. VII Всерос. совещ. 16-20 сент. 1996 г., Уральск. отд. РАН. — г.Чусовой, 1996. — 112 с.
57. Худов С.В., Самойлов П.И. Геологическое строение и комплексная оценка руд Гусевгорского месторождения // Горный журнал. — 1993. — С.7,8.
58. Чернышева Л.В., Смелянская Г.А., Зайцева Г.М. Типоморфизм магнетита и его использование при поисках и оценке рудных месторождений. — М.: Недра, 1981. — 225 с.
59. Чумарова И.В. Производство ванадиевых сплавов за рубежом. — М.: Черметинформация, 1986. — Вып.2. — 22 с.
60. Шабалин Л.И. Закономерности изменения содержания TiO_2 в титаномагнетите титаносных базитовых интрузивов // Зап. Всес. Мин. Об-ва. — 1986. — Ч.115, вып.1. — С.78-83.
61. Шабалин Л.И. Геолого-технологические типы титаномагнетитовых руд и пути их использования // Промышленно-генетические типы месторождений Сибири и геохимические предпосылки их комплексного использования. — Новосибирск: СНИИГиМС, 1990. — С.51-59.
62. Hukkanen E., Welden H. The production of vanadium and steel from titanomagnetites // Int.J.Miner.Pvocess. — 1985. — Vol.815, № 1-2. — P.82-102.

63. *O'Donell T.A., Wood D.G., Pong T.K.H.* Extraction and purification of titanium products from titanium minerals: Пат. 628464 Австралия, МКИ⁵ C01 G 023/02 The University of Melbourne. — № 48186/90; Заявл. 18.12.89; Опубл. 17.09.92.

64. *Rohrmann B.* Supply Lemand and application of vanadium and titanium. Highveld Steel and Vanadium Corporation. — Johannesburg, 1995. — 21 p.

65. *Johan Z., Ohnenstetter M., Slansky E.* Platinum mineralization in the Alashan — type in trusike complexes near Fifield, New South Wales, Australia. Part 1 // Miner and Petrol. — 1989. — Vol.40, № 4. — P.289-309.

Оглавление

Введение	1
Промышленно-генетические типы месторождений титаномагнетитовых руд	4
Минерально-геохимические особенности титаномагнетита различных типов руд	10
Металлы платиновой группы и золото в титаномагнетитовых рудах	17
Минерально-геохимические особенности силикатной составляющей титаномагнетитовых руд	23
Апатитоносность титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд	26
Запасы титаномагнетитовых руд РФ и производство титаномагнетитовых концентратов	27
Перспективы расширения комплексного использования титаномагнетитовых руд	32
Основные способы металлургического передела титаномагнетитового сырья	33
Получение ванадия из титаномагнетитового сырья	37
Перспективные направления использования ванадиевых шлаков	47
Новые пути использования титаномагнетита	52
Заключение	58
Литература	60

Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Полубабкин В.А., Усков Е.Д. Комплексное использование титаномагнетитовых руд. — М., 1997. — 65 с.: ил. — (Лаб. и технол. исслед. минер. сырья). Обзор / ЗАО "Геоинформмарк". — Библиогр.: с. 60-65 (65 назв.).

Рассмотрены перспективы расширения комплексного использования титаномагнетитовых руд РФ, относящихся к различным промышленно-генетическим типам.

*Леонид Федорович Борисенко
Леонид Михайлович Делицын
Виктор Алексеевич Полубабкин
Евгений Дмитриевич Усков*

Комплексное использование титаномагнетитовых руд

Ведущий редактор И.Н.Маркова
Технический редактор М.К. Кузьмина
Корректор Е.В. Кормакова

Подписано в печать с оригинал-макета *10.04.98*

Формат 60×84/16

Бумага картографическая

Печать офсетная

Усл.печ.л. *3,95*

Усл.кр.-отт. *4,3*

Уч.-изд.л. *3,6*

Тираж *170 экз.*

Заказ *9*

ЗАО "Геоинформмарк". 109172, Москва, ул.Гончарная, 38. Тел.ред. 915-60-84

ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОЙ СЛУЖБЫ!

Если Вы заинтересованы в оперативном рекламировании результатов НИОКР, направляйте материалы по разработанным техническим средствам, технологиям, методикам и другой научно-технической продукции (НТПр) в наши информационные издания:

в виде краткого сообщения о НТПр
(назначение, область применения,
преимущества перед аналогами,
краткое описание

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

или техническая характеристика,
организация- разработчик,
год разработки и внедрения);

в виде статей по тем же разработкам,
но с более подробным описанием
НТПр, с изложением технико-
экономических
результатов

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

испытания или внедрения
и сопровождением соответствующего
графического и табличного материала

Реклама на НТПр, разработанную по заданиям Федеральной программы развития МСБ России, принимается бесплатно.

За статьи в информационном сборнике
авторам выплачивается гонорар.

**Активно участвуйте в составлении материалов для наших изданий.
Это значительно ускорит реализацию научно-технических разработок!**



109172, Москва, ул. Гончарная (бывш. Володарского), 38
АОЗТ "Геоинформмарк"
тел. 915 61 00