

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ имени Н.М.ФЕДОРОВСКОГО» (ФГБУ «ВИМС»)

На правах рукописи



Пикалова Варвара Сергеевна

**ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НОВОГО
ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА НИОБИЕВЫХ РУД
НА ПРИМЕРЕ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Специальность 25.00.11 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Л.З. Быховский

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И РУД НИОБИЯ	12
2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИОБИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ РОССИИ, БРАЗИЛИИ И КАНАДЫ	18
2.1. МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ В МАССИВАХ УЩК.....	19
2.1.1. <i>Месторождение Ниобек</i>	<i>19</i>
2.1.2. <i>Большетагнинское месторождение</i>	<i>21</i>
2.1.3. <i>Белозиминское месторождение</i>	<i>23</i>
2.2. МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ В КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ УЩК.....	25
2.2.1. <i>Месторождение Араша.....</i>	<i>25</i>
2.2.2. <i>Белозиминское месторождение</i>	<i>27</i>
2.2.3. <i>Чуктуконское месторождение</i>	<i>28</i>
2.2.4. <i>Томторское месторождение</i>	<i>31</i>
2.2.5. <i>Татарское месторождение</i>	<i>33</i>
2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	35
3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ С РУДАМИ НОВОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА	40
3.1. ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ И АДМИНИСТРАТИВНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ.....	40
3.2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ И СТРОЕНИЕ РАЙОНА	41
3.3. МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ РАЙОНА.....	43
3.4. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И РУДОНОСНОСТИ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МАССИВА УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ	46
3.5. ГЕОЛОГИЯ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ.....	46
3.5.1. <i>Геологическое строение</i>	<i>46</i>
3.5.2. <i>Вещественный состав и природные типы руд</i>	<i>50</i>
3.5.3. <i>Геолого-промышленный тип и генезис месторождения</i>	<i>54</i>
3.5.4. <i>Характеристика рудных тел</i>	<i>55</i>
3.5.5. <i>Группа месторождения по сложности геологического строения</i>	<i>58</i>
3.5.6. <i>Запасы месторождения</i>	<i>58</i>
3.6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МАЛООБЪЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ	59
3.7. ОСНОВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	62
4. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУД БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА	64
4.1. КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ НИОБИЕВЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД.....	64
4.1.1. <i>Основные направления механического обогащения руд.....</i>	<i>64</i>
4.1.2. <i>Основные направления химико-технологической переработки концентратов.....</i>	<i>65</i>
4.2. ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРЕДЛОЖЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ПЕРЕРАБОТКИ РУД.....	67
4.2.1. <i>Радиометрическое обогащение.....</i>	<i>67</i>
4.2.2. <i>Рудоподготовка</i>	<i>68</i>

4.2.3. Глубокое обогащение	70
4.2.4. Гидрометаллургическая переработка.....	72
4.2.5. Пирометаллургическая переработка	76
4.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	76
4.3.1. Краткая характеристика оптимизационного подхода	76
4.3.2. Выбор оптимальных технологических решений.....	77
4.3.2.1. Обоснование эффективности использования предварительного рентгенорадиометрического обогащения	79
4.3.2.2. Обоснование оптимального метода рудоподготовки.....	81
4.3.2.3. Обоснование оптимального варианта металлургического передела	83
5. ОБОСНОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗНАЧИМОСТИ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ.....	86
5.1. КРАТКИЕ МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЫНКОВ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	86
5.1.1. Обзор рынка ниобиевой продукции	86
5.1.2. Краткие обзоры рынков попутной товарной продукции.....	96
5.2. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЯТЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.....	102
5.3. РАЗРАБОТКА ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ	106
5.3.1. Моделирование вариантов изменения внутренних факторов	108
5.3.2. Моделирование вариантов изменения внешних факторов.....	109
5.3.3. Моделирование вариантов совместного освоения Большектагнинского месторождения ниобия с другими преимущественно редкометалльными сырьевыми объектами Зиминского рудного района	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128

СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 2.1.1. Геологическая карта карбонатитового комплекса Сент-Оноре	20
Рис. 2.1.2. Схематическая геологическая карта Большетагнинского массива УЩК	22
Рис. 2.1.3. Геологическая карта Белозиминского массива УЩК	24
Рис. 2.2.1. Схематическое геологическое строение массива Араша.....	26
Рис. 2.2.2. Схематическая геологическая карта Чуктуконского рудного поля.....	30
Рис. 2.2.3. Схематическая геологическая карта массива Томтор (без покрывных образований)	32
Рис. 2.2.4. Схематическая геологическая карта района месторождения Татарское.....	34
Рис. 3.1.1. Обзорная схема района месторождения	41
Рис. 3.2.1. Схема тектонического строения и размещения полезных ископаемых Зиминского рудного узла.....	44
Рис. 3.5.1. Формы нахождения и морфология минералов ниобия в руде.....	51
Рис. 3.5.2. Геологический разрез по профилю 6	56
Рис. 3.6.1. Принципиальная схема выделения технологических типов и сортов руд Большетагнинского месторождения (схематический разрез профиля 7).....	60
Рис. 4.2.1. Принципиальная схема переработки руд (карьер I очереди)	73
Рис. 4.2.2. Принципиальная схема переработки руд (карьер II очереди)	74
Рис. 4.2.3. Блок-схема химико-металлургической переработки объединенного пироклорового концентрата и микроклинового продукта, полученных в результате глубокого обогащения ВИМС (2009-2011 гг.).....	75
Рис. 4.3.1. Варианты технологии переработки руд Большетагнинского месторождения	80
Рис. 4.3.2. Блок-схема вариантов металлургической технологии переработки флотационного пироклорового концентрата.....	83
Рис. 4.3.3. Результаты экономической оценки альтернативных технологий химико- металлургической переработки флотационного концентрата.....	84
Рис. 5.1.1. Структура мирового потребления ниобия.....	91
Рис. 5.1.2. Структура мирового производства ниобийсодержащих сталей и сплавов в 2015 г. ..	91
Рис. 5.1.3. Объем производства РЗЭ в мире и прогноз до 2025 г	100
Рис. 5.3.1. Основные этапы моделирования	107
Рис. 5.3.2. График изменения ЧДД в зависимости от изменения различных факторов	110
Рис. 5.3.3. Оценка «запаса прочности» инвестиционного проекта освоения Большетагнинского месторождения	113
Рис. 5.3.4. Расположение месторождений Зиминского рудного района	115
Рис. 5.3.5. Сценарии совместного освоения месторождений Зиминского рудного района в Иркутской области.....	121
Рис. 5.3.6. Сравнение структуры стоимости товарной продукции, получаемой по сценарию 4, в зависимости от наличия переработки апатитового концентрата.....	123

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1.1.1. Промышленные и потенциально-промышленные типы месторождений ниобия, тантала и редкоземельных руд	15
Таблица 2.3.1. Сравнительный анализ геологического строения и качества руд некоторых зарубежных и отечественных месторождений ниобия, генетически связанных с массивами УЩК	36
Таблица 3.5.1. Химический состав технологических проб микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слюдитовых руд Большетагнинского месторождения	52
Таблица 3.5.2. Минеральный состав технологических проб микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слюдитовых руд Большетагнинского месторождения	52
Таблица 3.5.3. Баланс распределения Nb_2O_5 по минералам микроклинитовой (1), карбонатит-слюдитовой (2) и слюдитовой (3) руды	54
Таблица 3.5.4. Параметры рудных тел Главной рудной залежи	57
Таблица 3.6.1. Технологическая типизация малообъёмных проб по обогатимости	61
Таблица 4.2.1. Сопоставление эффективности сухого центробежно-ударного и мокрого шарового измельчения микроклинитовой руды пробы БТ24к и керновой пробы БТ54	69
Таблица 4.3.1. Анализ влияния использования предварительного РРО на эффективность освоения Большетагнинского месторождения	81
Таблица 4.3.2. Сводная таблица сопоставления вариантов рудоподготовки	82
Таблица 5.1.1. Существующий сектор отечественного рынка ниобия	93
Таблица 5.1.2. Химический состав феррониобия стандартной марки производства СВММ	94
Таблица 5.1.3. Выписка из ГОСТ 16773-2003: феррониобий	94
Таблица 5.2.1. Основные технико-экономические показатели промышленного освоения Большетагнинского месторождения по двум этапам отработки	104
Таблица 5.3.1. Результирующие технико-экономические показатели сценариев освоения месторождений Зиминского рудного района	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспеченность Российской Федерации редкими металлами является важным условием модернизации отечественной промышленности [Козловский, 2002]. Одним из востребованных редких металлов является ниобий – легирующий металл, который обладает устойчивостью к действию многих агрессивных сред, тугоплавкостью, коррозионной стойкостью, способностью образовывать жаропрочные, сверхпроводящие и другие сплавы.

По запасам ниобия, являющегося стратегическим видом минерального сырья, наша страна занимает второе место в мире (после Бразилии), а по ресурсам их Россия – безусловный мировой лидер. При этом потребность России в феррониобии удовлетворяется большей частью за счет импорта. Сейчас отечественная ниобиевая продукция (в виде пентоксида ниобия) производится только Соликамским магниевым заводом из лопаритовых концентратов Ловозерского ГОКа. Оработка Татарского месторождения ниобия, из руд которого производилось небольшое количество феррониобия, приостановлена, а лицензия сдана. Учитывая количество и качество ниобиевых руд, числящихся на Государственном балансе запасов (ГБЗ) полезных ископаемых, а также особенности размещения ниобийсодержащих месторождений, обеспечение российской промышленности собственным ниобиевым сырьем может быть осуществлено за счет освоения отечественных месторождений ниобия и создания на их основе горнорудных предприятий [Машковцев и др., 2008; Темнов, Пикалова, 2013].

Экономическая целесообразность освоения ниобиевых месторождений РФ определяется целым рядом показателей, среди важнейших из которых можно назвать: природно-территориальную доступность, относительно простой минеральный состав руд, из которых можно получать максимально ликвидные товарные продукты в целесообразном количестве, наличие рациональных технологических решений по обогащению и переделу руд. Среди ниобиевых месторождений этим показателям в значительной мере отвечают объекты Зиминского рудного района в Иркутской области. Здесь расположены территориально сближенные ниобиевые и комплексные ниобийсодержащие месторождения – крупное Белозиминское, среднее по масштабу запасов Большетагнинское и мелкое Среднезиминское, суммарный ресурсный потенциал которых является самым значительным в России (44,6% балансовых запасов кат. А+В+С₁).

Руды Большетагнинского месторождения, в отличие от всех известных в РФ месторождений ниобия, связаны не с собственно коренными карбонатитами или развитыми по ним корами выветривания (КВ), как обычно в мире, а с силикатными метасоматитами карбонатитового комплекса, и представляют собой новый потенциально-промышленный тип ниобиевых руд, которые в мире не обрабатываются. Для руд Большетагнинского месторождения потребовалось создание нестандартной технологической схемы их переработки с получением на экономически

выгодных условиях востребованной товарной продукции. Кроме ниобиевой продукции на месторождении возможно получение значительного количества высококалийевого микроклинового концентрата, являющегося ценным сырьем для электрокерамической промышленности, фарфорофаянсового производства и изготовления электродов.

Дополнительными предпосылками для первоочередного освоения Большетагнинского месторождения является простое геологическое строение, благоприятные горно-геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия, позволяющие вести разработку месторождения открытым способом.

В целом рудные месторождения Зиминского района, из которых, помимо ниобия, можно получать высококачественный апатитовый концентрат, пригодный для производства дефицитных в восточных регионах России фосфатных удобрений, а также редкие земли, флюорит и микроклин, могут стать основой создания единого горно-металлургического центра по производству редкометалльной и ценной неметаллической продукции. Большетагнинское месторождение является вторым по масштабам запасов среди ниобиевых месторождений Зиминского района, поэтому проведение геолого-экономической оценки руд нового типа с учетом возможных технологических решений, а также разработки предложений по эффективному освоению Большетагнинского месторождения и управлению сырьевыми ресурсами Зиминского рудного района чрезвычайно важно и определяет актуальность диссертационной работы.

Цель работы – обоснование промышленной значимости нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд Большетагнинского месторождения и выбор оптимальной схемы его освоения.

Основным объектом исследования является ниобиевое месторождение Зиминского рудного района – Большетагнинское. Дополнительно к исследованию привлечены локализованные в пределах того же рудного района ниобиевые Белозиминское и Среднезиминское, а также Большетагнинское флюоритовое месторождения.

Основные задачи работы

1. Обосновать выбор Большетагнинского ниобиевого месторождения как одного из наиболее перспективных для первоочередного освоения в современных условиях.
2. Выявить и проанализировать факторы, влияющие на эффективность освоения Большетагнинского месторождения ниобия.
3. Проанализировать эффективность альтернативных технологических решений по переработке руд для выбора оптимального варианта применительно к условиям Большетагнинского месторождения.

4. Выполнить геолого-экономическую оценку целесообразности освоения Большетагнинского ниобиевого месторождения с учетом инновационного комплекса технологических решений.

5. Обосновать промышленную значимость Большетагнинского месторождения ниобия в современных рыночных условиях России.

6. Разработать рекомендации по повышению эффективности освоения месторождений Зиминского рудного района в целом.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- выполнен сравнительный анализ современных геологических и минералогических данных по ниобиевым месторождениям России и зарубежным объектам (Бразилии, Канады) с целью объективной оценки потенциала освоения отечественной минерально-сырьевой базы ниобия;

- предложен экономический критерий оптимальности отдельного блока технологической схемы – показатель затратности, на основе которого выполнен обоснованный выбор наиболее эффективного комплекса технологических решений;

- обоснована целесообразность промышленного освоения Большетагнинского месторождения на основе применения экономически эффективной инновационной технологии переработки руд;

- разработана научно-обоснованная экономическая модель освоения минерально-сырьевой базы Зиминского рудного района в Иркутской области с оценкой эффективности работы горно-обогатительного и химико-металлургического комплексов.

Научное и практическое значение исследования:

- на основе проведенной геолого-экономической оценки Большетагнинского месторождения обоснованы разведочные кондиции для подсчета запасов; подсчитанные по данным кондициям запасы утверждены ГКЗ и учтены ГБЗ;

- намечены пути повышения инвестиционной привлекательности Белозиминского месторождения: применение усовершенствованной технологии обогащения руд и переработки концентратов, дальнейшая переработка получаемого в качестве товарной продукции апатитового концентрата на фосфорные удобрения (аммофос) и редкоземельный концентрат;

- на основе проведенной экономической оценки доказана целесообразность освоения отечественных месторождений ниобия с целью снижения импортной зависимости предприятий России по одному из остродефицитных стратегических редких металлов, и оценена возможность его полного импортозамещения;

– проведена переоценка месторождений Зиминского рудного района в современных экономических условиях, на основе которой сделан вывод о его высоком потенциале и возможности создания на его базе крупного центра добычи и производства широкой номенклатуры редкометалльной и сопутствующей товарной продукции.

Методы исследования. Исследования носили комплексный характер и включали в себя: анализ и научное обобщение геологических, технологических, геолого-экономических материалов; маркетинговые исследования; экономический и инвестиционный анализы. Автором использованы результаты минералого-аналитических исследований и технологических испытаний руд, выполненных в ФГУП «ВИМС».

Научные положения, выносимые на защиту

1. Совокупность особенностей геологического строения и минералого-технологических характеристик руд нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд в силикатных метасоматитах карбонатитового комплекса позволяет рекомендовать Большетагнинское месторождение как наиболее перспективный в современных условиях источник получения ниобия в России.

2. Обоснована экономически оптимальная комбинированная схема переработки руд Большетагнинского месторождения, включающая предварительную крупнокусковую радиометрическую сепарацию, специальную рудоподготовку, гравитационно-магнитно-флотационное обогащение, нестандартную схему химико-металлургического передела продуктов обогащения с получением в качестве товарных продуктов феррониобия, микроклинового, апатитового и уранового концентратов.

3. Геолого-экономическая оценка нового типа ниобиевых руд, выполненная на основе разработанной экономической модели месторождения и включающая оценку экономической эффективности сценариев освоения Большетагнинского месторождения и Зиминского рудного узла в целом на базе единого горно-металлургического комплекса, с учетом различных рыночных ситуаций позволяет утверждать о его промышленной значимости.

Фактический материал и личный вклад. В основу диссертации положены результаты научно-исследовательских работ, а также материалы работ по государственным контрактам и хозяйственным договорам, выполненных автором в 2009-2015 гг. в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Рудная геология, минералогия и геохимия» по направлению «Прогнозирование, поиски и изучение месторождений стратегических видов минерального сырья и подготовка кадров высшей квалификации для атомной энергетики» на кафедре геологии месторождений полезных ископаемых Института геологии минеральных ресурсов Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) и в отделе геолого-экономической и экологической оценки месторождений ФГУП «ВИМС». Автор являлся одним из исполнителей работ по геолого-экономической пере-

оценке Белозиминского и оценке Большетагнинского месторождений, проведенной на основе разработанных современных технологий переработки руд, участником разработки геолого-экономических и организационных мероприятий по подготовке минерально-сырьевой базы для крупного химико-металлургического производства в Иркутской области, а также рекомендаций по ее освоению. В работе использованы: данные фондовых геологических отчетов, материалы по технико-экономическому обоснованию разведочных кондиций; правовые и методические документы, действующие в сфере недропользования; результаты минералого-аналитических исследований и укрупненных лабораторных технологических испытаний, выполненных сотрудниками структурных подразделений ФГУП «ВИМС» и ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина».

Апробация работы и публикации. Результаты исследования и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях и советах: II научно-практической конференции «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» (Новосибирск, 2015 г.); научной конференции с международным участием «Новые подходы в химической технологии переработки минерального сырья. Применение процессов экстракции и сорбции» (Санкт-Петербург, 2013 г.); XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2013 г.); IX Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2013 г.); заседании Ученого совета ФГУП «ВИМС», посвященном рассмотрению результатов работ, выполненных по объекту «Технологическая и геолого-экономическая переоценка Белозиминского и Большетагнинского месторождений» (Москва, 2013 г.); III и IV научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов (Москва, ВИМС, 2011, 2012 гг.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе 5 – в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 136 страницах машинописного текста; списка литературы из 103 наименований; содержит 15 таблиц и 27 рисунков. *Введение* содержит информацию об актуальности, целях и задачах исследования; показаны научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора. В *первой главе* приведены существующие классификации месторождений ниобия. Во *второй главе* на основе современных данных о геологическом строении объектов и минералоготехнологических особенностях их руд проведен сравнительный анализ некоторых отечественных и зарубежных месторождений ниобия. *Третья глава* содержит общую характеристику Большетагнинского месторождения ниобия. В *четвертой главе* проведен экономический анализ отдельных альтернативных блоков технологической схемы с выбором оптимальных. *Пятая глава* посвящена геолого-экономической оценке Большетагнинского месторождения и моделированию вариантов его промышленного освоения, в том числе совместно с другими сырьевыми

объектами Зиминского рудного района, в различных рыночных ситуациях. В *заключении* перечислены основные научные и практические результаты работы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.г.-м.н. Л.З. Быховскому за руководство, ценные замечания и редакцию научной работы. Диссертант сердечно благодарит к.г.-м.н. А.В. Темнова за помощь в процессе совместной работы, содержательные консультации и постоянную поддержку. За совместное выполнение работ, профессиональные советы, конструктивные замечания и дружеское участие в обсуждении аспектов рассмотренной в диссертации проблемы автор искренне благодарен к.т.н. Е.Г. Лихникевич, к.т.н. Н.Ю. Стенину, к.х.н. С.И. Ануфриевой, Л.П. Тигунову, к.г.-м.н. Г.И. Россману, к.г.-м.н. Л.В. Спорыхиной, д.г.-м.н. Р.В. Голевой, к.г.-м.н. С.Д. Потанину. Особую признательность автор выражает своим коллегам – сотрудникам отдела геолого-экономической и экологической оценки месторождений и технологического отдела ФГУП «ВИМС», а также сотрудникам ФГУП «ИМГРЭ» и Института ферросплавов и техногенного сырья им. академика Н.П. Лекишева.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И РУД НИОБИЯ

Ниобий относится к числу редких элементов, которых всего насчитывается 35 [Быховский, Потанин, 2009; Авдонин, 1999; Гинзбург, 1957 и др.]. Общей особенностью редких элементов является использование практически всех их в новейших современных технологиях, а вследствие чего позднее вовлечение их в промышленное использование (последние 30-50 лет) и постоянно возрастающее потребление.

Редкие элементы обычно концентрируются в комплексных месторождениях, объединяясь в них в зависимости от геохимических особенностей. Поэтому ниобий чаще всего рассматривается вместе с танталом, т.к. они близки по химическим свойствам и часто встречаются совместно. Большинство типов месторождений ниобия и тантала характеризуется высокой комплексностью. Они содержат ассоциации минералов: фосфора, циркония, редких земель, скандия, стронция, бария, железа, титана, тория (месторождения щелочного ряда) или бериллия, рубидия, цезия, олова (граниты и пегматиты).

Ниобий и тантал – типичные оксифильные элементы: в природе известны только их кислородные соединения. Самой распространенной составной частью сложных оксидов ниобия и тантала являются редкие земли в количестве до 35% (иногда 50%), а также часто присутствует уран, иногда вместе с торием.

Месторождения ниобия и тантала **по преобладанию одного из металлов**, получаемой при переработке руд основной товарной продукции, а также в зависимости от экономического значения данных металлов **подразделяются** на четыре группы: **ниобиевые, тантал-ниобиевые, танталовые и ниобийсодержащие** [Быховский, Потанин, 2009; Методические рекомендации по применению классификации..., 2007].

К **собственно ниобиевым** относятся месторождения пироксеновых карбонатитов, их коры выветривания и связанные с ними россыпи. Основную ценность их составляет ниобий, отношение $Nb_2O_5/Ta_2O_5 > 20$; извлечение тантала нерентабельно, он уходит в ферросплавы вместе с ниобием.

Комплексными тантал-ниобиевыми считаются месторождения, в которых тантал и ниобий по валовой ценности примерно одинаковы: $Nb_2O_5/Ta_2O_5 = 5-20$. Это месторождения в дифференцированных массивах агапитовых нефелиновых сиенитов, месторождения в метасоматически измененных гранитоидах щелочного ряда, а также в апогнейсовых метасоматитах зон региональных разломов.

Главным полезным компонентом **собственно танталовых** месторождений является тантал, отношение $Nb_2O_5/Ta_2O_5 \leq 4$, ниобий извлекается попутно. Основные запасы собственно танталовых руд сосредоточены в гранитных пегматитах и в «редкометалльных» гранитах.

В **ниобийсодержащих** месторождениях тантал и ниобий являются попутными компонентами. Так, например, в нефтеносных песках Ярегского месторождения они содержатся в виде примесей в лейкоксене, а ниобийсодержащий сфен присутствует в апатит-нефелиновых месторождениях Хибин (Кукисвумчоррское, Апатитовый Цирк и др.) . Практическое использование их зависит от многих факторов: масштабов промышленного освоения месторождения по основному компоненту, наличия технологии извлечения, и, в основном, не является экономически эффективным.

По условиям образования месторождения ниобиевых руд разделяются на эндогенные и экзогенные. Все эндогенные месторождения связаны с щелочными и субщелочными породами. Экзогенные месторождения представлены площадными и линейными корами выветривания, развивающимися на коренных породах, а также аллювиальными, склоново-аллювиальными, озёрными и флювио-гляциальными россыпями колумбита, пирохлора, лопарита, реже фергусонита и эвксенита.

В зависимости от характера танталониобиевой минерализации в редкометалльных месторождениях России выделяются следующие основные технологические типы руд: лопаритовый, пирохлоровый, пирохлор-колумбитовый, гатчеттолитовый, танталитовый, колумбит-пирохлор-микролитовый и пирохлор-монацит-крандаллитовый [Кудрин и др., 1998].

Классификация промышленных и потенциально-промышленных типов месторождений ниобия, тантала и редкоземельных руд приведены в табл. 1.1.1 [Методические рекомендации по применению классификации..., 2007].

Месторождения, связанные с массивами ультраосновных щелочных пород и карбонатов (УЩК), являются одним из основных источников ниобия в мире, а промышленное оруденение располагается непосредственно в самих карбонатитовых комплексах и/или в развитых по ним корях выветривания [Быховский, Кудрин, 2001; Важнейшие промышленные типы..., 1997; Кременецкий и др., 1998; Лапин, Толстов, 1995; Методические рекомендации по применению классификации..., 2007].

Основными **промышленными** и потенциально-промышленными типами таких месторождений ниобия являются [Быховский, Потанин, 2009; Методические рекомендации..., 2007]:

- **ниобиевый в массивах УЩК** (Сент-Оноре, Ока, Белозиминское, Большетагнинское);
- **ниобий-танталовый в массивах УЩК** (Среднезиминское, Неске-Вара);
- **фосфор-ниобиевый в гидрослюдистых корях выветривания (КВ) карбонатитов в массивах УЩК** (Белозиминское);
- **редкоземельно-ниобиевый в латеритных КВ карбонатитов в массивах УЩК** (Араша, Каталан, Чуктуконское);

- ниобиевый в зернистых КВ линейных карбонатитов и щелочных метасоматитов (Татарское);
- скандий-редкоземельно-ниобиевый в переотложенных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов (Томторское).

Отнесение выделенных типов месторождений к промышленным обусловлено наличием таких объектов за рубежом, с успехом разрабатываемых в настоящее время. Отечественные месторождения рассмотренных промышленных типов (Белозиминское, Большетагнинское, Чукотконское) не разрабатываются.

Массивы УЩК большей частью характеризуются округлыми формами и кольцевым или неполнокольцевым строением, значительно реже они построены по линейному плану. Сами карбонатиты слагают округлые штоки, кольцевые дайки, неполнокольцевые тела, трубки и выступают как конечные дифференциаты ультраосновных щелочных комплексов.

Карбонатиты представлены кальцитовыми, доломитовыми, анкеритовыми разностями. Пироксеновое оруденение в карбонатитах образует равномерную вкрапленность и с глубиной практически не изменяется. Рудные тела, оконтуриваемые по данным опробования, характеризуются обычно линейной формой и выделяются как обогащенные зоны ($0,2-0,8\% \text{Nb}_2\text{O}_5$) на фоне бедных содержаний Nb_2O_5 ($0,05-0,08\%$). Рудоносные породы наряду с форстеритом, флогопитом или пиритом содержат комплекс полезных минералов – апатит, монацит, иногда циркон, бадделеит и магнетит; средне-крупнокристаллические кальцитовые карбонатиты могут представлять интерес как карбонатное сырье [Фролов и др., 2003, 2005; Эпштейн, 1994]. В качестве примеров можно привести месторождения Белозиминское (Россия) и Сент-Оноре (Канада).

В редких случаях пироксеновое оруденение в массивах ультраосновных щелочных пород развивается не в карбонатитах, а в микроклинитах – калишпатовых метасоматитах по ультраосновным щелочным породам (Большетагнинское месторождение в Иркутской области). Апатит-пироксеновая минерализация Большетагнинского месторождения слагает линзовидную залежь, состоящую из вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд и прослеженную по простиранию на расстояние 600 м при ширине выхода до 300 м. Среднее содержание Nb_2O_5 в руде около $1,0\%$ [Быховский, Потанин, 2009].

Иногда в карбонатитах присутствует гатчеттолит, который находится в виде мелкой вкрапленности и образует самостоятельные рудные зоны или слагает фланги пироксеновых зон. Руды комплексные тантал-ниобиевые, соотношение $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ta}_2\text{O}_5$ варьирует в пределах 4,5-8 (Среднезиминское месторождение, некоторые рудные зоны Белозиминского).

Таблица 1.1.1

Промышленные и потенциально-промышленные типы месторождений ниобия, тантала и редкоземельных руд

Промышленный тип месторождений	Структурно-морфологический тип рудных тел и комплекс вмещающих пород	Природный (минеральный) тип руд	Содержание основных компонентов в руде, %	Попутные компоненты	Промышленный* (технологический) тип руд	Примеры месторождений
1	2	3	4	5	6	7
Цериевоземельно-ниобий-танталовый в дифференцированных массивах аптаитовых нефелиновых сиенитов	Пластообразные полого залегающие залежи в урритах, ювитах, малиньитах	Лопаритовый	Nb_2O_5 0,20-0,40; Ta_2O_5 0,018-0,027; TR_2O_3 0,9-1,4	Ti, Sr, Th	Химический редкоземельно-тантал-ниобиевый (сортировочный, гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Ловозерское (Россия)
Ниобиевый в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатов	Линзовидный, жильный, штоко-, трубообразный в карбонатитах	Пироклоровый	Nb_2O_5 0,2-0,8	P, TR, Ta, U, Zr	Металлургический ниобиевый (сортировочный, гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Белозиминское (Россия), Сент-Оноре (Канада)
	Линзообразный в микроклинитах	«	Nb_2O_5 0,3-1,2	P, микроклин	Металлургический ниобиевый (сортировочный, гравитационно-магнитно-флотационно-гидрометаллургический)	Большетагнинское (Россия)
Цериевоземельный в бастнезитовых карбонатитах	Штоко-, трубо- и жилообразный в карбонатитах	Бастнезитовый	TR_2O_3 0,9-9,0	Fe, U, Th, барит, флюорит	Химический флюорит-барит-стронций-редкоземельный (сортировочный, гравитационно-магнитно-флотационно-гидрометаллургический)	Маунтин-Пасс (США), Карасугское (Россия)

1	2	3	4	5	6	7
Ниобий-танталовый в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда	Штоко- и линзообразный в кварц-альбит-микроклиновых и альбитовых метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда	Циркон-пирохлор-колумбитовый	Nb_2O_5 0,12-0,40; Ta_2O_5 0,014-0,040; ZrO_2 0,3-0,7	TR, Li, Th, U, Hf, Rb, криолит	Металлургический цирконий-ниобий-танталовый (гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Улуг-Танзекское, Зашихинское (Россия)
Редкоземельно-ниобий-танталовый в щелочных метасоматитах	Линзо- и пластообразный в метасоматитах по метаморфическим породам	Циркон-тантал-пиро-хлоровый с фторидами редких земель	Nb_2O_5 0,20-0,40; Ta_2O_5 0,012-0,025; ZrO_2 1,5–1,6; TR_2O_3 0,2-0,4	Y, U, Th, Hf, Zn, Pb, криолит	Металлургический ниобий-танталовый с цирконием и редкими землями (гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Катугинское (Россия)
Танталовый в литий-фтористых гранитах	Куполовидный и линзообразный в апикальных частях массивов амазонитовых гранитов	Микролит-танталит-колумбитовый	Ta_2O_5 0,010-0,018	Nb, Li, Sn, Rb, амазонит	Химико-металлургический танталовый (гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Орловское, Этыкинское (Россия)
Литий-танталовый в сподуменовых гранитах	Куполовидные тела в апикальных частях массивов сподуменовых гранитов	Сподумен-танталитовый	Ta_2O_5 0,010-0,016; Li_2O 0,6-1,0	Nb, Rb, Cs	Химико-металлургический литий-танталовый с ниобием (гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Алахинское (Россия)
Танталовый в пегматитах (с Li, Cs, Be)	Плитообразный и жильный в амфиболитах, гнейсах, сланцах	Сподумен-берилл-танталитовый, поллукит-сподумен-танталитовый, лепидолит-микролитовый	Ta_2O_5 0,01-0,03; Cs_2O 0,1-0,8; Li_2O 0,3-1,5; BeO 0,02-0,07	Sn, Rb, Nb, Ga	Химико-металлургический бериллий-литий-цезий-танталовый (сортiroвочный, гравитационно-флотационно-гидрометаллургический)	Завитинское, Вишняковское, Гольцовое (Россия), Берник-Лейк (Канада), Гринбушес (Австралия)

[illegible]

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НИОБИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ РОССИИ, БРАЗИЛИИ И КАНАДЫ

С целью определения наиболее ценного типа руд с точки зрения получения ниобиевой продукции изучены геологические и минералого-технологические особенности руд некоторых отечественных редкометалльных месторождений в сравнении с зарубежными разрабатываемыми объектами-аналогами.

Критериями выбора объектов изучения явились: а) принадлежность их к группе собственно ниобиевых месторождений, а именно связанных с массивами УЩК с оруденением как в самих карбонатитовых комплексах, так и в развитых по ним корам выветривания, б) наличие утвержденных балансовых запасов ниобия и другие факторы, повышающие привлекательность объекта.

Среди ниобиевых месторождений в массивах УЩК для анализа были отобраны:

- месторождение Ниобек (Niobec) комплекса Сент-Оноре (St. Honore) в Канаде, в настоящее время разрабатываемое Magris Resources;
- Большетагнинское месторождение в Иркутской области, руды которого характеризуются монометалльностью и высоким для данного типа содержанием Nb_2O_5 (~1%);
- коренные руды Белозиминского месторождения в Иркутской области, которые заключают в себе около 15% балансовых запасов кат. А+В+С₁ ниобия России.

Среди месторождений ниобия, локализованных в корях выветривания УЩК, – главного источника ниобия в мире (2/3 мировой добычи) более всего известны и интересны с точки зрения перспективности освоения:

- осваиваемое в Бразилии месторождение Араша (Араха), принадлежащее Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) и обеспечивающее около 90% мировой добычи ниобия;
- Белозиминское месторождение (руды коры выветривания) в Иркутской области, которые заключают в себе 19,5% балансовых запасов кат. А+В+С₁ ниобия России;
- Чуктуконское месторождение в Красноярском крае, которое характеризуется значительными прогнозными ресурсами ниобия и относительно высокими его содержаниями;
- Томторское месторождение в Республике Саха (Якутии), балансовые руды которого характеризуются уникальным содержанием Nb_2O_5 (6,71%), а прогнозные ресурсы – значительными размерами;
- Татарское месторождение в Красноярском крае, эксплуатировавшееся до 2013 г. и являвшееся единственным отечественным источником сырья для получения феррониобия.

2.1. Месторождения ниобия в массивах УЦК

2.1.1. Месторождение Ниобек

Месторождение расположено в 13 км севернее города Сагеней в провинции Квебек (Канада). Экономически район месторождения хорошо развит; вблизи объекта проходит автодорога и ЛЭП [Technical Report, 2013].

Рельеф местности преимущественно равнинный со средней абсолютной высотой 144 м. Гидросеть района принадлежит бассейну реки Shipshaw. Климат района умеренно континентальный. Среднегодовая температура 2,3°C, при средней температуре в январе –16,1°C, июле 18,1°C. В районе месторождения выпадает около 950 мм осадков в год, их пик приходится на июль (123 мм), минимум – на февраль (51 мм). Снежный покров образуется в основном в ноябре и разрушается в марте, редко – апреле, достигая максимума высоты в декабре.

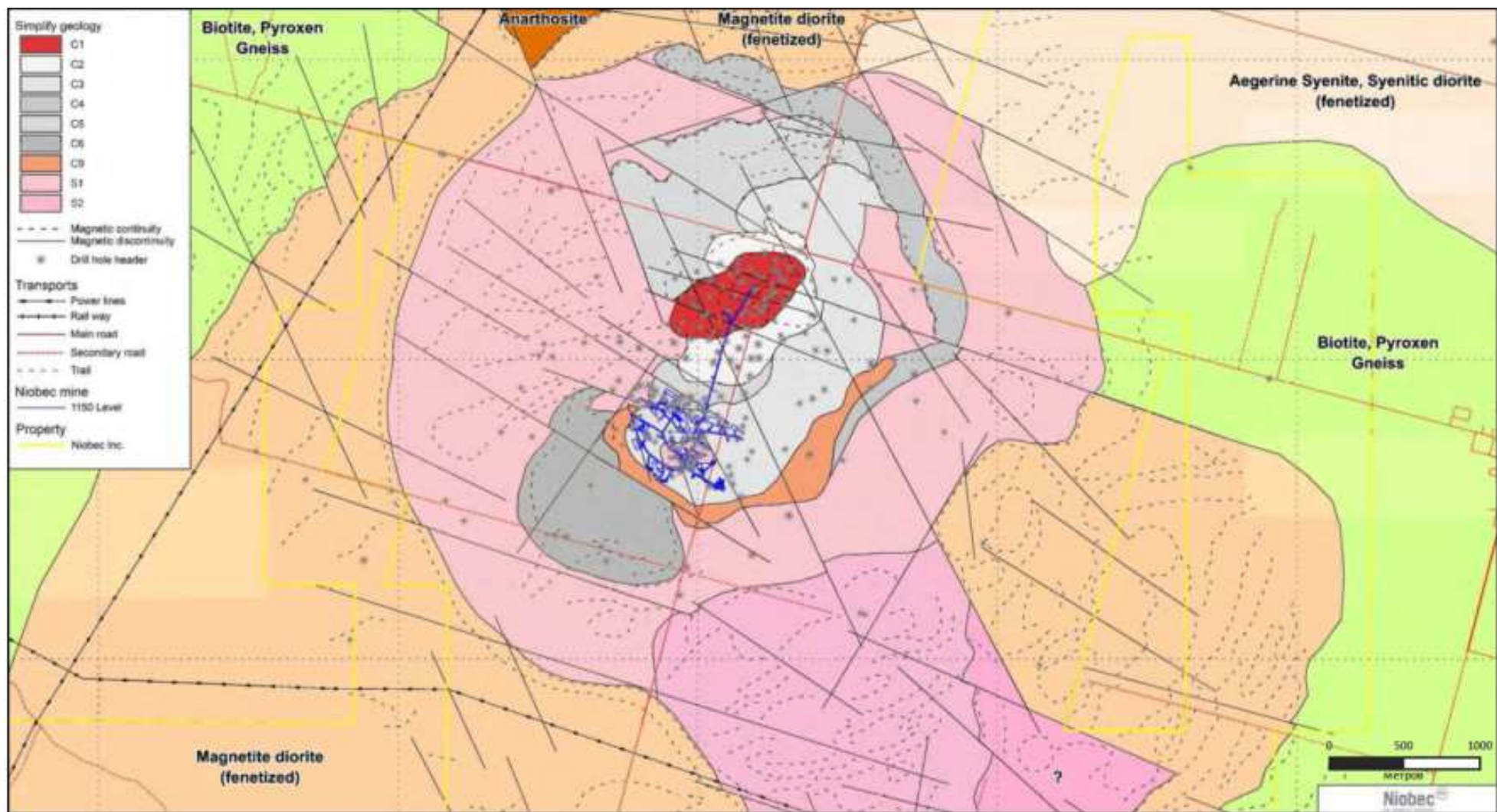
Месторождение Ниобек расположено в юго-восточной части карбонатитового комплекса Сант-Оноре (Saint-Honore). Массив УЦК овальной формы площадью около 15 км² (рис. 2.1.1) расположен на окраине Канадского щита в зоне грабена Сагеней. Массив концентрически зонален: ядро, сложенное многостадийными карбонатитами, окружено кольцом ийолитов, сиенитов и нефелиновых сиенитов. В центре карбонатитового ядра округлый шток доломитовых и анкеритовых карбонатитов, краевая зона сложена мелкозернистыми слоистыми доломитами. Ниобиевая минерализация связана с краевой зоной карбонатитов. Рудное тело имеет овальную форму с размерами 600×800 м.

В минеральном составе руд месторождения преобладают карбонаты (более 50%), доля оксидов (магнетита, гематита) – около 10%, силикатов (биотита, хлорита) – около 10%, апатита – около 10%, в меньшем количестве представлены сульфиды, а также флюорит, барит и циркон. Минералы-концентраторы ниобия – различные виды пироклора и колумбит – мелкозернистые (0,2-0,8 мм в диаметре).

Месторождение эксплуатируется с 1976 г. По состоянию на 01.01.2013 г. вероятные (probable) запасы составляли 416,42 млн. т (0,41% Nb₂O₅), достоверные (measured + indicated) ресурсы – 629,91 млн. т (0,42% Nb₂O₅).

Коренные руды мелкозернистые, пироклор-колумбитовые с монацитом и бастнезитом отрабатываются подземным способом. Производительность по добыче составляет около 2,4 млн. т в год.

Пироклоровые концентраты, получаемые в результате обогащения (флотации и магнитная сепарация) и химико-металлургической доводки (солянокислотное выщелачивание), содержат 58% Nb₂O₅. Из данных концентратов выплавляется феррониобий стандартного сорта (65% Nb).



Условные обозначения. C1-C9 – карбонаты: C1 – брекчиевидные частично анкеритизированные доломиты с TR минерализацией; C2 – белые массивные доломиты; C3 – доломитовые и кальцитовые карбонаты с пироксеном и апатитом, реже с магнетитом и биотитом (ниобиевые руды); C4 – флогопитовые карбонаты; C5 – доломиты со слабой ниобиевой и редкоземельной минерализацией; C6 – пироксеновые карбонаты; C9 – полевошпатовые доломиты; S1-S2 – ультраосновные щелочные породы: S1 – полевые шпаты и щелочно-полевошпатовые сиениты, ийолиты; S2 – канкринитовые, нефелиновые и гранатовые сиениты.

Рис. 2.1.1. Геологическая карта карбонатного комплекса Сент-Оноре [Technical Report, 2013]

2.1.2. Большетагнинское месторождение

Месторождение находится в пределах Тулунского района Иркутской области в 160 км от города и одноименной станции Восточно-Сибирской железной дороги Тулун, в 19 км от бывшего поселка Белозиминский. Ближайший населенный пункт – с. Уйгат расположено в 110 км.

Район характеризуется среднегорным расчлененным рельефом. Гидросеть района принадлежит бассейнам рек Ярма и Белая Тагна. Климат района резко континентальный с продолжительной и холодной зимой. Средняя температура в январе от -15 до -22 градусов Цельсия, в июле от +15 до 17 градусов. В районе месторождения выпадает от 543 мм до 958 мм осадков в год, причем наибольшее их количество приходится на июль-август. Снежный покров образуется во второй половине октября и разрушается в мае. Вечная мерзлота носит островной характер, сезонное промерзание почвы до 3 м.

Зиминский район, в котором находится Большетагнинское месторождение, расположен в краевой, юго-западной, части Сибирской платформы и тяготеет к зоне сочленения последней с Алтае-Саянской складчатой областью. Основным тектоническим элементом Сибирской платформы, вмещающим месторождение, является Урикско-Ийский прогиб [Пожарицкая и др., 2006; Отчет о результатах..., 1993ф; Потанин, 2001; Фролов и др., 1999].

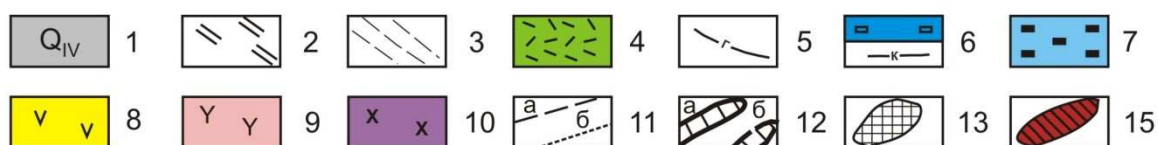
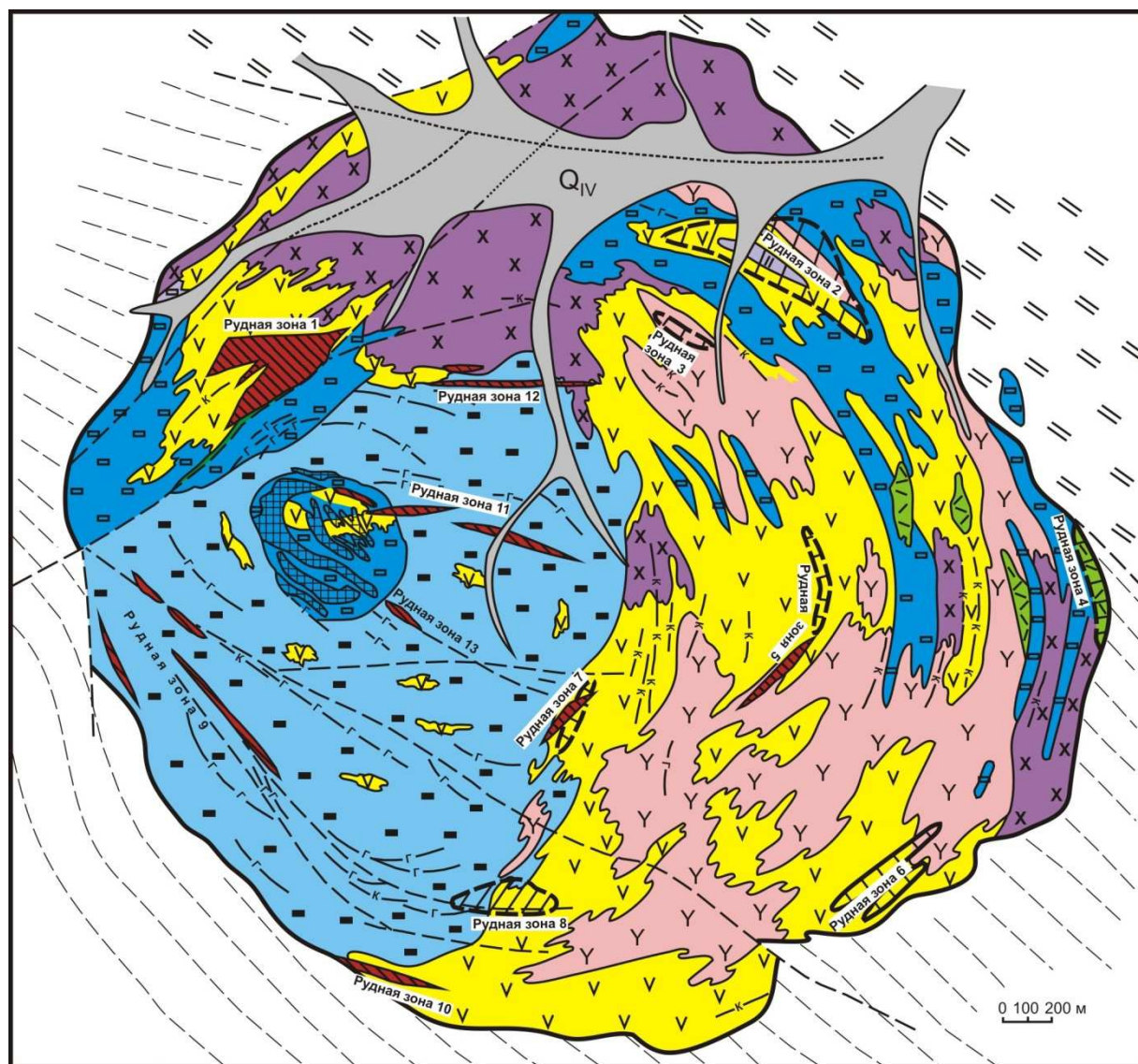
В пределах Большетагнинского массива УЩК (площадью 13,8 км²) выявлено 13 рудных зон с апатит-пироксеновым оруденением. Из них в силикатных породах (микроклинитах и слюдитах) расположено 9 рудных зон, в том числе и зона № 1 – собственно Большетагнинское месторождение ниобия (рис. 2.1.2).

Большетагнинское месторождение приурочено к зоне контакта карбонатитового штока с силикатными породами. Площадь месторождения - 0,173 км². Рудовмещающими породами являются микроклиниты и слюдиты, в отличие от месторождений-аналогов, где оруденение расположено в карбонатитах. Руды месторождения отнесены к новому потенциально-промышленному типу – в силикатных метасоматитах карбонатитовых комплексов. В пределах слюдитового типа руд, по результатам минералогического картирования, выделены два сорта: карбонатит-слюдитовый и собственно слюдитовый.

Главным рудным минералом ниобия во всех типах руд является пироксен. Попутные полезные компоненты - фосфор (в апатите) и микроклин (только в микроклинитовых рудах), а также уран.

Месторождение относится ко 2-ой группе сложности геологического строения.

Месторождение числится в Государственном балансе запасов. По запасам ниобия оно среднее по масштабу с рядовыми рудами (0,969% Nb₂O₅). Содержание в руде попутных полезных компонентов: 3,94% P₂O₅, 69,26% микроклина. Запасы урана на месторождении составляют 524,9 т. Изученность объекта соответствует оценочной стадии.



1 - четвертичные отложения: галечник, пески, суглинки; 2 - игнашинская свита (R_1): серицит-хлоритовые сланцы, песчаники; 3 - урикская свита (PR_1): углисто-глинистые сланцы, песчаники. Большетагнинский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (4-10): 4 - апатит-слюдистые метасоматиты (слюдиты); 5 - дайки пикритовых парфиритов; 6 - кальцитовые карбонаты доломитизированные, анкеритизированные, мелко-среднезернистые, II фаза; 7 - кальцитовые карбонаты средне-крупнозернистые, I фаза; 8 - микроклиновые метасоматиты (микроклиниты); 9 - щелочные и нефелиновые сиениты; 10 - ийолиты; 11 - разломы: а - установленные, б - предполагаемые; 12 - контуры апатитовых рудных тел при бортовом содержании P_2O_5 - 2,5%: а - установленные, б - предполагаемые; 13 - флюоритовые рудные тела; 14 - рудные зоны с апатит-пироксеновой минерализацией.

Рис. 2.1.2. Схематическая геологическая карта Большетагнинского массива УЩК [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф]

Горно-геологические и инженерно-геологические условия месторождения являются благоприятными для разработки объекта открытым способом, с применением предварительного рыхления, как пород вскрыши, так и руды, взрывным способом. По сложности гидрогеологических условий месторождение относится к группе средних [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф].

Основными природными факторами опасности при освоении месторождения являются повышенная сейсмичность (балльность 7, средняя степень риска), развитие эрозионных процессов (степень развития слабая, пограничная со средней) и гравитационных процессов (средняя). Воздействие криогенного фактора характеризуется слабой степенью риска.

Технология переработки руд месторождения разработана на основе укрупненных лабораторных исследований. Общая её схема выглядит следующим образом. В голове процесса применяется радиометрическое разделение добытой горной массы по содержанию железа на два типа – микроклинитовый и карбонатит-слюдитовый/слюдитовый. Далее два типа руды по отдельности обогащаются методом рентгенорадиометрического обогащения (РРО) и поступают на глубокое обогащение по комбинированным схемам, для чего на фабрике организованы две независимые секции обогащения. Получаемые одноименные концентраты объединяются, при этом пироклоровый концентрат поступает на химическую переработку, микроклиновое – на кислотную доводку, а апатитовый отгружается непосредственно потребителю. В результате химико-технологической переработки пироклорового концентрата получается пентаоксид ниобия металлургического качества NbO-M, направляемый далее на выплавку феррониобия сорта ФНб60, и урановый концентрат. В результате кислотной доводки микроклинового продукта получается полевошпатовый продукт с содержанием Fe_2O_3 0,29%.

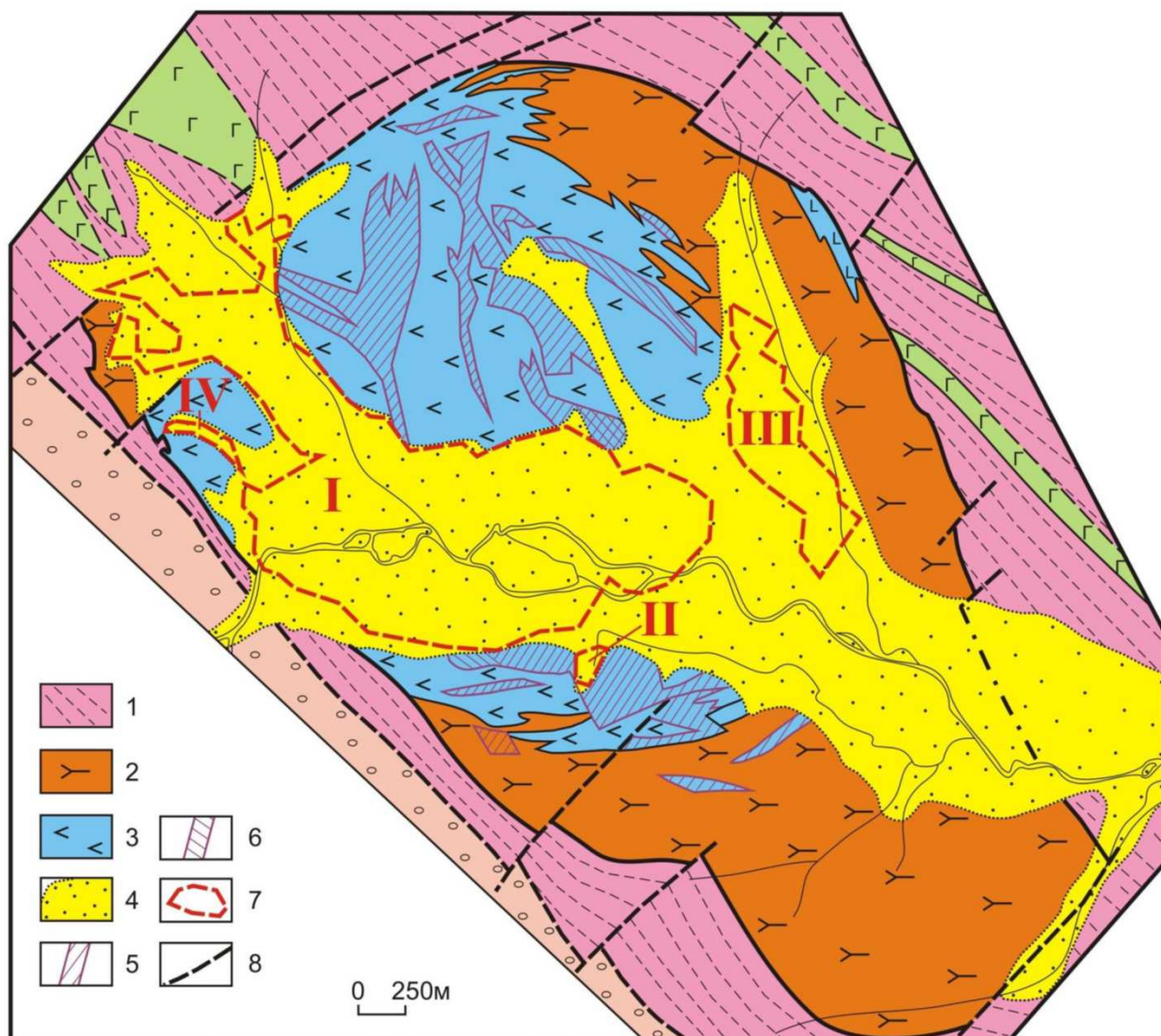
2.1.3. Белозиминское месторождение

Месторождение находится в пределах Тулунского района Иркутской области в 160 км от города и одноименной станции Восточно-Сибирской железной дороги Тулун, в 19 км от Большетагинского месторождения. Ближайшим населенными пунктами являются пос. Уйгат (90 км). Рельеф и климат района описан в п. 2.1.2.

В орографическом отношении район Белозиминского месторождения носит типичные черты низко- среднегорного ландшафта. Для площади развития пород Белозиминского массива характерен рельеф с отметками 750-920 м.

Основным водотоком в районе месторождения являются реки Белая Зима, Черная Зима и Зима. В пределах поля развития пород Белозиминского массива УЩК долина р. Белая Зима составляет 1100-1200 м. Ширина русла реки колеблется в пределах 10-15 м. Русло реки меандрирует. Расход реки колеблется от 0,03 до 4,5 м³/сек. Максимальные расходы приходятся на май-август за счет снеготаяния и атмосферных осадков.

Белозиминское месторождение, находящееся в Зиминском рудном районе, приурочено к одноименному массиву УЩК. Форма массива в плане близка к неправильному овалу, вытянутому в северо-западном направлении (рис. 2.1.3). Длина его около 6 км, ширина от 2,2 до 3,6 км, площадь около 18 км² [Быховский, Потанин, 2009; Фролов и др., 1999].



1 - осадочно-метаморфические породы с субпластовыми интрузиями габбро-диабазов; Белозиминский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (2-7): 2 - ийолиты, мельтейгиты, нефелиновые сиениты; 3 - карбонатиты, 4 - коры выветривания; рудные зоны в карбонатитах: 5 - с апатит-пироксеновым оруденением, 6 - с апатит-гачеттолитовым оруденением; 7 - рудные зоны в коре выветривания (участки: I - Основной, II - Ягодный, III - Аварийный, IV - Линейный); 8 - разломы

Рис. 2.1.3. Геологическая карта Белозиминского массива УЩК
[Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф]

В пределах Белозиминского массива разведаны месторождения как в карбонатитах, так и в развитых по ним корам выветривания. Основные полезные компоненты – Nb, P; попутные – Ta и TR.

Центральная (ядерная) часть массива сложена карбонатитами, образующими штокообразное тело площадью 9 км², периферия – породами ряда ийолиты-мельтейгиты, содержащими реликты пироксенитов, а также дайки нефелиновых сиенитов и пикритовых порфиритов. Выделяются четыре стадии формирования карбонатитов [Пожарицкая, 1972], с тремя из которых связана разнообразная редкометалльная минерализация. Ниобиевое оруденение приурочено ко второй и третьей стадии карбонатитового процесса – кальцитовым и кальцит-доломитовым карбонатитам. В карбонатитах IV-ой стадии, основное значение приобретает редкоземельная минерализация.

Выделяются 5 рудных зон. В центральной части массива – штокообразная форма, в периферической части – рудные тела в форме серий кулисообразно расположенных жилообразных тел, падающих к центру массива под углами 70-75°. Размеры зон колеблются от 0,25 до 3 км по простиранию при суммарной («прессованной») мощности 20-70 м. Оруденение прослежено до глубины 1130 м.

Наиболее крупная рудная зона в южной части массива, содержащая богатое оруденение с крупновкрапленным пирохлором, представлена неизмененными диопсид-форстерит-флогопит-кальцитовыми карбонатитами II стадии, среди остальных зон преобладают карбонатиты III стадии [Геолого-экономическая оценка..., 2014ф].

Содержание Nb₂O₅ в первичных карбонатитовых рудах наиболее перспективного Южного участка – 0,25%, P₂O₅ – 3,73% (запасы категории C₁+C₂). Запасы коренных руд и руд коры выветривания учтены Государственным балансом и по ниобию составляют 34,5% от общероссийских (кат. A+B+C₁), в т.ч. 15% – коренные руды. Запасы коренных руд являются резервной сырьевой базой при возможной отработке руд коры выветривания.

Разработана технологическая схема, предполагающая в голове процесса радиометрическую покусковую сепарацию и последующее обогащение руд гравитационно-флотационными методами. Далее осуществляется химическая доводка черного пирохлорового концентрата с получением пригодного для выплавки феррониобия кондиционного по фосфору концентрата. В качестве других товарных продуктов могут быть получены апатитовый концентрат (36% P₂O₅), кальцитовый (47,4% CaO) и сульфидный продукты.

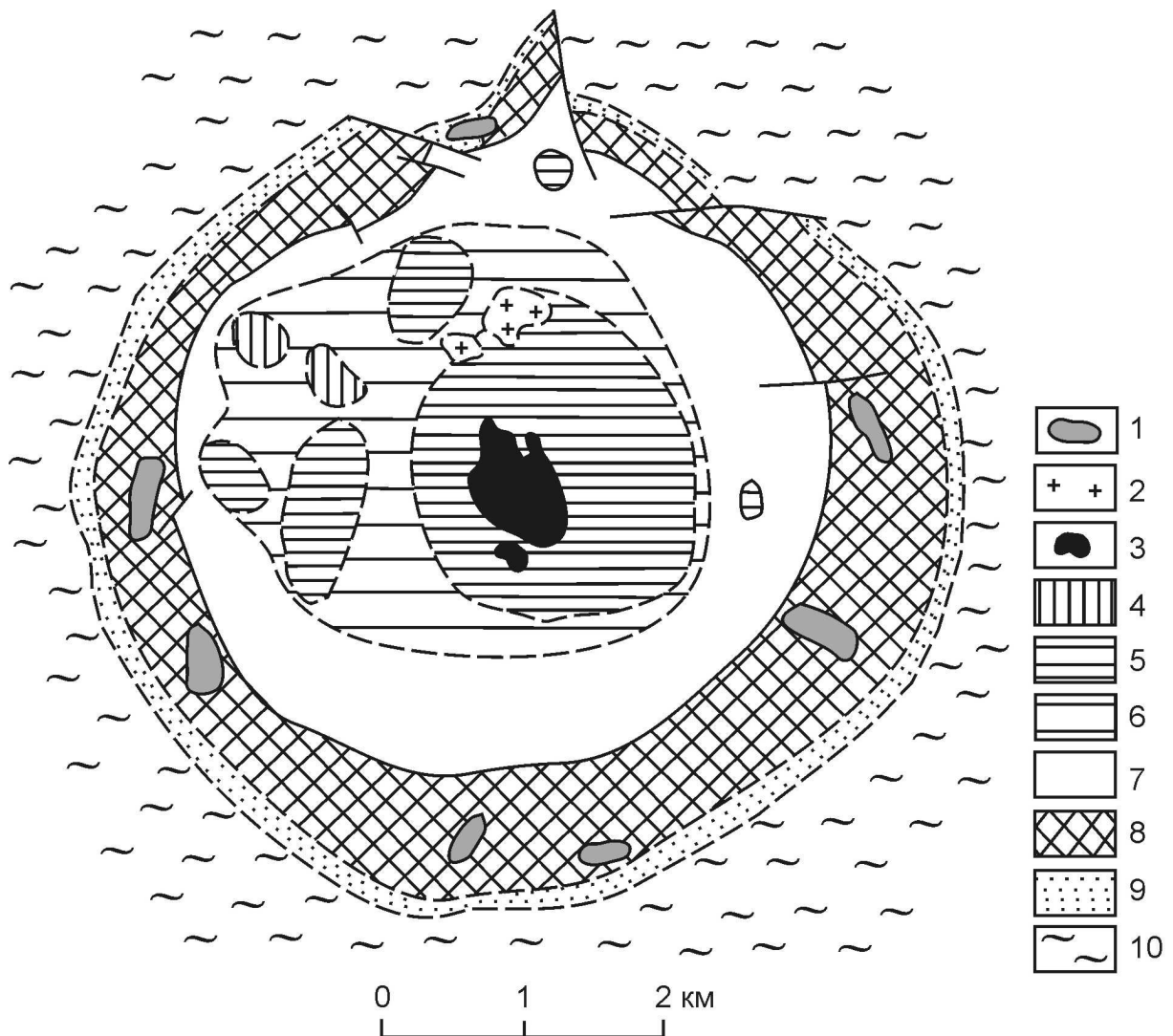
2.2. Месторождения ниобия в корах выветривания УЩК

2.2.1. Месторождение Араша

Месторождение расположено в 6 км к югу от г. Араша штата Минас-Жерайс в Бразилии. Климат местности горный тропический.

Карбонатитовый комплекс расположено в восточной приатлантической части Восточно-Бразильского щита Южно-Американской платформы. В плане он имеет овальную форму с диа-

метром около 4,5 км. Массив сложен в основном доломитовыми карбонатами (бефотаритами), включающими сегрегации флогопит-апатит-магнетитового состава. Краевая зона массива сложена породами существенно слюдяного состава – «слюдитами» (рис. 2.2.1) [Лапин, Толстов, 1995].



1 - барит-железисто-кремнистые породы; 2 - фосфатные руды; 3 - ниобиевые руды; 4 - кальцитовые карбонаты; 5 - доломитовые карбонаты с подчиненными участками слюдитов; 6 - доломитовые карбонаты и слюдиты; 7 - слюдиты с подчиненными участками доломитовых карбонатов; 8-9 - фенитизированные породы: 8 - кварциты, 9 - сланцы; 10 - слюдяные сланцы.

Рис. 2.2.1. Схематическое геологическое строение массива Араша [Быховский, Потанин, 2009]

Промышленное оруденение связано с остаточными латеритными КВ карбонатов. Богатая пироксеном зона округлой формы и диаметром около 1800 м. Мощность КВ составляет 100-200 м и более. С поверхности месторождение перекрыто горизонтом темно-красных железняков мощностью 0,5-40 м. Месторождение детально разведано, ведется его разработка. Подтвержденные запасы составляют около 4300 тыс. т Nb_2O_5 при среднем содержании в руде 2,5% Nb_2O_5 [Filho, et al., 2009].

Месторождение отрабатывается карьером. Для транспортировки руды на обогатительную фабрику, находящуюся на расстоянии 3,2 км, используется ленточный конвейер.

Ниобиевые руды представляют собой тонкодисперсный охристый материал. Главный рудный минерал – пандайт (баріопірохлор), образующий мелкие (редко до 1 мм) кристаллы. Содержание Nb_2O_5 в пандайте составляет 63,4%. Кроме пірохлора в существенных количествах присутствуют монацит, ильменит, магнетит и др. минералы. Основным полезным компонентом – ниобий, остальные компоненты (редкие земли, фосфор, барий) из руд не извлекаются.

Максимальное освобождение пірохлора достигается при дроблении руды до размера 0,1 мм. После дробления руды дешламируются, дешламированная фракция поступает на магнитную сепарацию для удаления магнетита. Глубокое обогащение осуществляется избирательной флотацией пірохлора. Извлечение ниобия составляет 70%. Получаемый пірохлоровый концентрат содержит повышенные количества фосфора, серы и свинца. Для устранения этих вредных примесей концентрат прокаливается с хлоридом и известью и обрабатывается 5%-й соляной кислотой. Получаемые концентраты содержат 59-65% Nb_2O_5 и нацело перерабатываются в феррониобий и другую конечную продукцию.

2.2.2. Белозиминское месторождение

Географическое расположение месторождения, рельеф, климат и геологическое строение района и пр. описаны в пунктах 2.1.2-2.1.3.

В долине р. Белая Зима, разделяющей Белозиминский массив на Северный и Южный участки, широко развита кора выветривания остаточного типа (ОКВ) по карбонатитам Белозиминского месторождения. Она образует плащеобразную залежь протяженностью 4,8 км при максимальной ширине 1,2 км и средней мощности 35,8 м.

В строении ОКВ сверху вниз выделяются два горизонта: охр и сыпучек. Охры – конечный продукт выветривания коренных пород – состоят из гидроксидов и оксидов железа (до 70%), каолинита, нонтронита, монтмориллонита, гидрослюда. Количество карбонатов – до 5%. Сыпучки – промежуточные образования между коренными породами и охрами – представлены дезинтегрированным материалом карбонатитов с примесью гидроксидов железа [Лапин, Толстов, 1995; Потанин и др., 2006].

Руды коры выветривания Белозиминского месторождения имеют наибольшую промышленную ценность. Самые высокие содержания полезных компонентов отмечаются в горизонте охр, особенно в верхних его частях.

Главные рудные минералы коры выветривания карбонатитов – пірохлор, колумбит, гатчеттолит, апатит. Главные полезные компоненты – ниобий и фосфор.

Руды ОКВ детально разведаны, запасы учтены Государственным балансом. Месторождение среднее по масштабам по запасам ниобия (19,5% от российских) и фосфора (3% от российских). В 1970-1991 гг. велась их опытная добыча.

Белозиминское месторождение относится к разряду крупных с изменчивой морфологией (протяженность отдельных рудных залежей от сотен м до 3,6 км при ширине 70-100 м с невыдержанной мощностью), слабопрерывистым оруденением (наличие останцов неветрелых пород, реликтов сыпучек, карстовые явления) и неравномерным распределением полезных компонентов. По сложности геологического строения месторождение относится ко 2-й группе по классификации ГКЗ.

В пределах остаточной коры выветривания выделено шесть залежей (участков), расположенных главным образом в охристом горизонте и характеризующихся пласто- и линзообразной формой. В пределах Основного участка сконцентрировано 90% запасов со средним содержанием 0,56% Nb_2O_5 . Наиболее высокие содержания ниобия (1,39% Nb_2O_5) установлены в пределах небольшого участка Ягодный, в значительной степени отработанного при опытно-промышленной эксплуатации.

Горно-геологические условия месторождения предполагают отработку открытым способом. В связи со сложными гидрогеологическими условиями (вся толща рыхлых пород обводнена за счет р. Белая Зима) необходимо строительство водоотводных каналов, а также применение в карьере системы водопонижающих скважин.

Основная схема обогащения руд гравитационно-флотационная с химической доводкой чернового пирохлорового концентрата и выплавкой из кондиционного концентрата феррониобия методом алюминотермической плавки. В качестве товарных продуктов, получаемых при переработке руд месторождения, рассматриваются:

- феррониобий марки ФН658 (ГОСТ 16773-2003),
- редкоземельный концентрат (46,3% TR_2O_3)
- апатитовый концентрат (36% P_2O_5) или удобрение – аммофос.

2.2.3. Чуктуконское месторождение

Чуктуконское ниобий-редкоземельное месторождение расположено в Богучанском районе Красноярского края, в 110 км от г. Козьмодемьянск (где расположена Богучанская ГЭС), в 180 км от пристани Заледеево на р. Ангара, в 340 км от ж/д станции Карабула. В районе месторождения дорог нет.

Климат континентальный. В районе развита островная мерзлота. Рельеф слабо расчлененный с абсолютными отметками 200-430 м, на объекте 250-325 м. Гидросеть принадлежит бассейну р. Чадобец (правый приток р. Ангары). На месторождении протекает руч. Чуктукон.

Чадобецкий рудный район (60×40 км), включающий Чуктуконское месторождение, находится на южной оконечности Сибирской платформы. В тектоническом отношении он приурочен к крупной положительной структуре платформы – Чадобецкому куполовидному поднятию. Чуктуконское месторождение представлено мощной корой выветривания. В морфологическом отношении она является площадной с элементами линейной. Кора выветривания развита по всем образованиям – осадочным, щелочным ультраосновным породам, редкометалльными карбонатитам (рис. 2.2.2). Площадь КВ по карбонатитам сравнительно небольшая – около 16 км², мощность её достигает 300 м [Лапин, Толстов, 1995; Ломаев, Сердюк, 2011; Машковцев и др., 2011; Фролов и др., 2003].

Редкометалльные руды коры выветривания карбонатитов по составу и структуре представлены следующими тремя главными разновидностями:

- бурые железняки от красновато-бурых оттенков до темно-бурых и черных, имеющие кусковато-желваковое строение размером от нескольких мм до 10-15 см. Залежи пород составляют около 14% объема КВ;

- охры (глинистые, рыхлые, сыпучие желто-бурого цвета, черные тонкодисперсные породы), нередко содержащие желваки бурых железняков, составляют около 42% объема КВ;

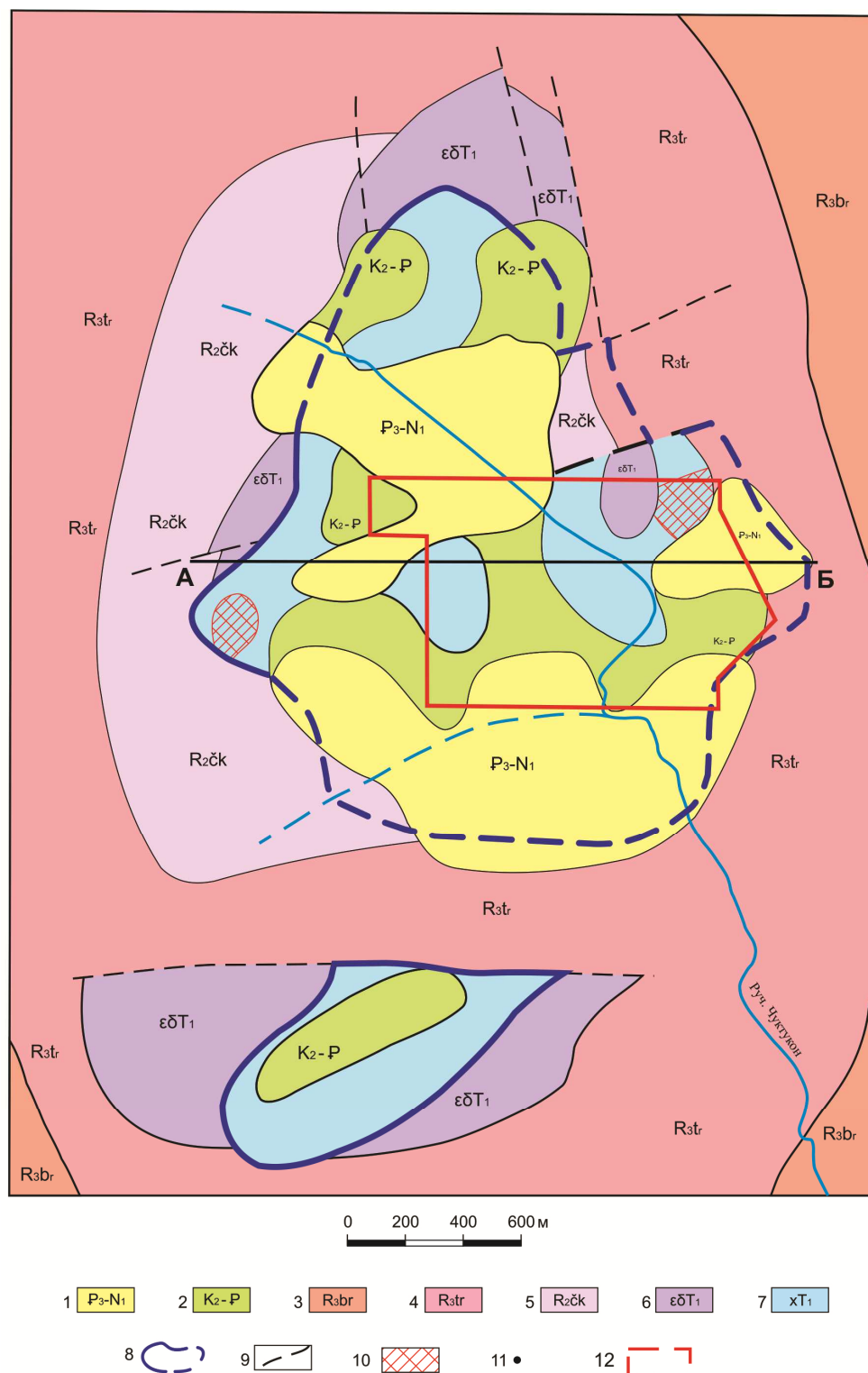
- глины охристые, рыхлые или комковатые, желтые или желто-бурые, отличающиеся от охр более светлой окраской и более низким содержанием окислов и гидроокислов Fe и Mn при несколько повышенном содержании глинозема и кремнезема, составляют около 44% объема КВ.

Рудная зона месторождения представляет собой мощную плащеобразную залежь протяженностью 3,5 км при ширине от 800 до 1400 м и мощности до 200 м. Выделены два типа руд: ниобиевые (по бортовому содержанию Nb₂O₅ – 0,8%) и редкоземельные (по бортовому содержанию РЗМ – 3,0%). Она имеет значительную сплошность с отдельными окнами безрудных и слабо оруденелых кор.

Максимальные проявления как редкоземельного, так и ниобиевого оруденения приурочены к зрелым КВ латеритного типа и практически вписываются в контур максимального их развития. Образование высоких концентраций ниобия и редких земель в КВ происходит на фоне выноса кальция, алюминия, кремнезема и щелочных металлов при одновременной концентрации оксидов железа и марганца.

Минеральный состав руд: гетит, гидрогетит, гематит, псиломелан, пиролюзит, бариопироксид, стронциопироксид, цериопироксид, пироксид, флоренсит, монацит, церианит.

Кроме ниобия и РЗМ для Чуктуконского месторождения определенный интерес представляют ввиду повсеместной распространенности, высоких содержаний и возможности выделения их в самостоятельный продукт марганец, железо, скандий, галлий, ванадий, возможно, цинк, молибден, торий, уран.



1 - глины с прослоями песков и гравия; 2 - бокситоносная толща; 3 - брусская свита; 4 - териновская свита; 5 - чуктуконская свита. Чадобецкий комплекс (6-7): 6 - ультраосновные щелочные породы; 7 - карбонатиты; 8 - контур развития рудоносных кор выветривания карбонатитов, в т. ч. под покровом МЗ-КЗ и рифейских отложений (пунктир); 9 - разломы; 10 - выход редкометалльных тел на поверхность; 11 - скважины, пробуренные предшественниками; 12 - проектные скважины: а) поисковые или оценочные, б) картировочные; 13 - контур проектного участка оценочных работ.

Рис. 2.2.2. Схематическая геологическая карта Чуктуконского рудного поля
[Разработка программы..., 2014ф]

Из всех разработанных схем [Ломаев, Сердюк, 2011; Полупромышленные технологические испытания..., 2006ф] наиболее приемлема пирогидрометаллургическая схема переработки руд. Вначале осуществляется восстановительная плавка с переводом металлов в чугун и шлак. В чугун вместе с железом извлекается марганец (82%), ниобий (65%), фосфор (88%) и ванадий. В шлаках содержание РЗМ повышается не менее чем в 4 раза и достигает 15-20%. Дальнейшая переработка предусматривает перевод этих металлов из чугуна в шлак путем окислительной обработки с выделением фосфорной, ванадиевой, марганцевой и ниобиевой продукции. Редкоземельные шлаки перерабатываются по гидрометаллургической схеме путем прямого выщелачивания азотной кислотой. При переработке ниобиевых руд доли ниобиевой и редкоземельной продукции в годовой выручке примерно равны (около 35%), при переработке редкоземельных – основной продукцией являются РЗМ (60%), а доля ниобия не превышает 15%. Таким образом, ведущим компонентом, определяющим ценность месторождения, являются редкие земли.

Государственным балансом учтены только запасы редкоземельных руд в количестве 6639 тыс. т, при содержании Nb_2O_5 - 0,6%, P_2O_5 – 7,3%. Данные запасы составляют ~3% от общих ресурсов месторождения и соответствуют масштабам: Nb - мелкое, TR - среднее.

2.2.4. Томторское месторождение

Месторождение расположено в пределах Оленекского улуса на северо-западе Республики Саха (Якутия) в 400 км к югу от побережья моря Лаптевых на слабовсхолмленной равнине с абсолютными отметками от 75 до 259 м и относительными превышениями до 80 м. Климат района резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким (2-2,5 месяца) летом. Температура воздуха колеблется от $-50^{\circ}C$ зимой до $+13^{\circ}C$ летом. Снежный покров сохраняется с середины сентября и до середины июня. Месторождение расположено на водоразделе рек Уджа и Чимара. Основным водотоком в районе месторождения является приток реки Уджа - речка Онгкучах в ее верхнем течении. Непосредственно на территории участка Буранный протекает приток р. Онгкучах - ручей Поманисточка.

Ближайший населенный пункт, расположенный в 80 км к западу от месторождения, - подбаза Эбеляхской ГРП нежилой пос. Амакинский, где есть взлетно-посадочная полоса, позволяющая сезонно (зимой и летом) принимать самолеты АН-2 и круглогодично вертолеты. В 110 км к западу находится поселок Эбелях с населением около 800 жителей, где расположена база Эбеляхской ГРП и аэропорт Анабар, принимающий круглогодично самолеты АН-2, вертолеты МИ-8 и МИ-26. Источниками энергоснабжения в районе работ являются дизельные электростанции, работающие исключительно на привозном топливе [Бортников и др., 2015].

Томторское месторождение приурочено к одному из крупнейших в мире карбонатитовых комплексов (300 км²). Массив расположен на северо-восточном склоне Анабарского кристаллического щита на севере Сибирской платформы в пределах Уджинского поднятия. Он

имеет округлую в плане форму и концентрически зональное строение: карбонатиты образуют его центральное ядро, а щелочные и нефелиновые сиениты, занимающие большую часть площади массива, слагают краевую зону. Карбонатизированные ийолиты, значительно уступающие по площади сиенитам, присутствуют в виде серповидного тела, отделяющего краевую зону от карбонатитового ядра массива (рис. 2.2.3).

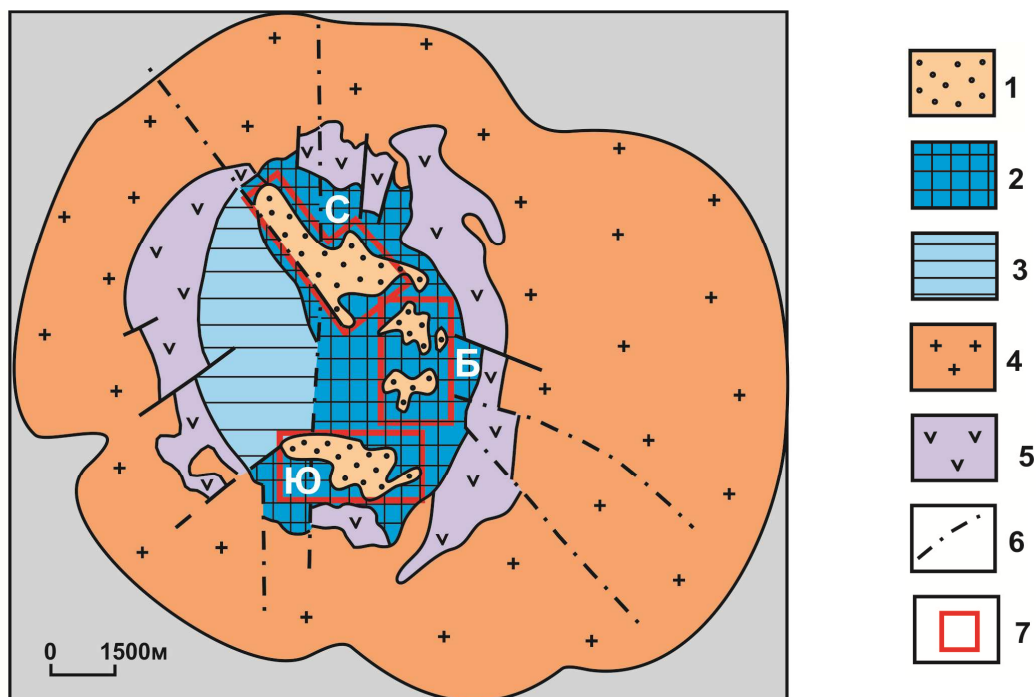


Рис. 2.2.3. Схематическая геологическая карта массива Томтор (без покрывных образований) [Проведение геолого-технологического..., 2016ф]

Месторождение включает в себя три типа руд (снизу вверх по разрезу): бедные эндогенные – карбонатитового комплекса, экзогенные – рядовые остаточных и ультрабогатые – перекрытых кор выветривания. Коры выветривания имеют максимальную мощность на карбонатитах, где достигают 300-400 и более метров. Именно с перекрытыми корами выветривания связано уникальное комплексное редкометальное оруденение [Лапин, Толстов, 1995; Лапин, 2015;].

Главные минеральные компоненты руд – монацит, минералы группы крандаллита: горсейксит, гоэцит, флоренсит, Sr-, Ba и Pb-пирохлоры с реликтами пирохлора обычного состава; оксиды титана, сульфиды железа, цинка и свинца.

В пределах Томторского рудного поля выделены участки: Буранный, Северный и Южный. Наиболее полно изучен участок Буранный, небольшая часть запасов которого поставлена на Государственный баланс. Запасы утверждены в ГКЗ в 1999 г. по категории В+С₁, но из-за недоизученности технологических свойств руд и недостоверной экономической оценки, месторо-

ждение было отнесено к оцененным. Запасы при бортовом содержании 3,5% Nb_2O_5 оценены в 1,2 млн. тонн сухой руды, при содержании Nb_2O_5 – 6,7%, La_2O_3 – 9,5%, Y_2O_3 – 0,6% (TR_2O_3 – 10,1%), Sc_2O_3 – 0,05%.

Значительно меньшей степенью изученности характеризуется Северный и Южный участки, где пробурены отдельные линии скважин и только в 2003 г. завершена поисковая стадия. В настоящее время ГРП на данных участках продолжены.

Особенности состава руд Томторского месторождения, представляющих собой по концентрации в них ниобия, редких земель, иттрия, скандия, фосфора природный пирохлор-монацитовый черной концентрат, позволяют осуществлять их эффективную переработку в основном только химико-металлургическими технологиями. Две принципиальные технологические схемы, разработанные (ИХХМП СО РАН; ВИМС; Гиредмет) в лабораторных условиях и апробированные в укрупненно-лабораторном масштабе, позволяют получать ниобиевый продукт (NbO-M или пирохлоровый концентрат), оксид скандия, оксид иттрия, индивидуальные РЗО [Быховский и др., 2014; Геолого-экономическая оценка..., 2009ф].

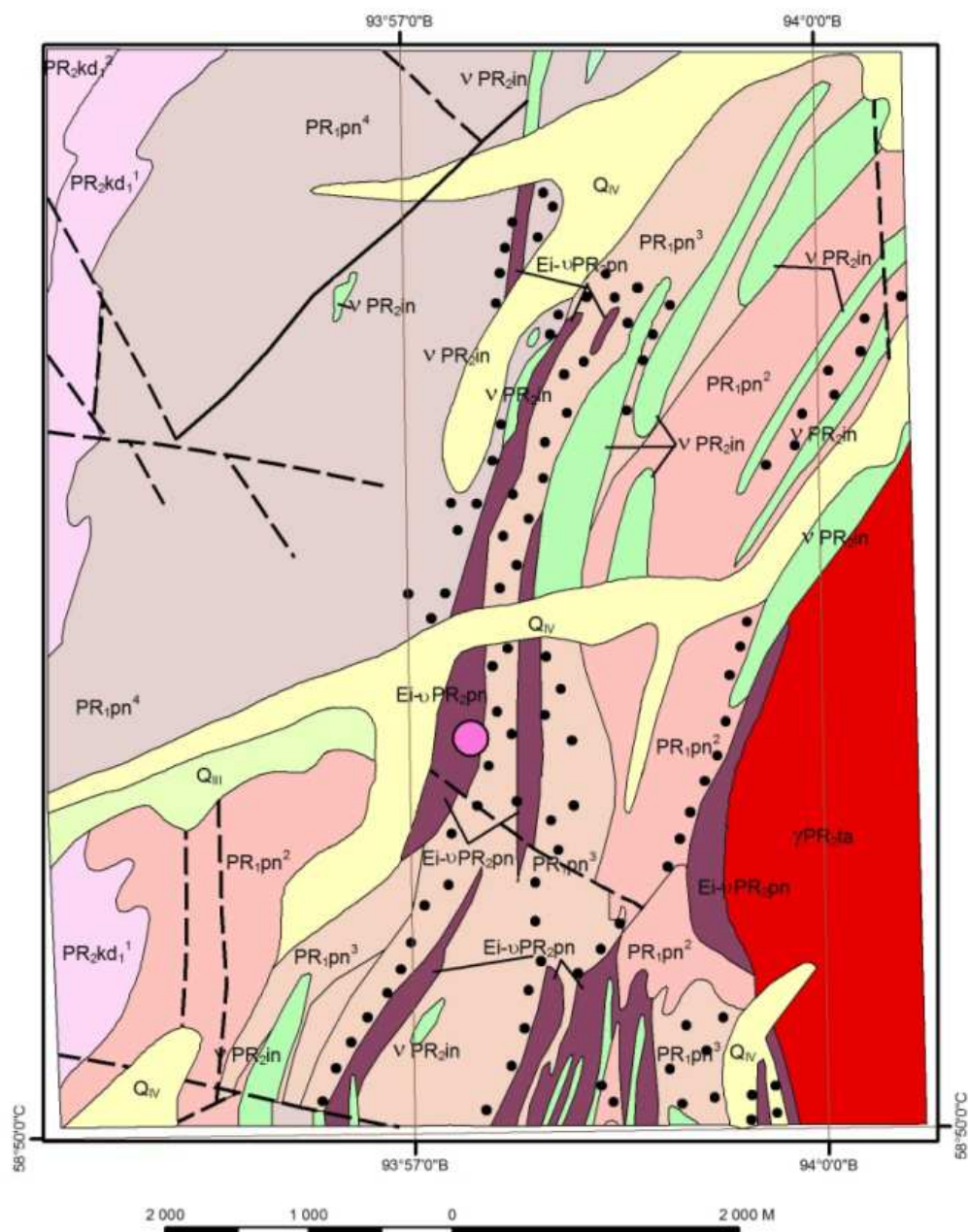
2.2.5. Татарское месторождение

Месторождение расположено на границе Северо-Енисейского и Мотыгинского районов Красноярского края, в 110 км от ж/д ст. Лесосибирск, в 150 км от пристани Мотыгинона р. Ангара. Ближайший населенный пункт п. Партизанский связан с месторождением автодорогой (36 км).

Рельеф низкорослый, слаборасчлененный, абсолютная отметка в районе месторождения 300-791,5 м, обнаженность плохая. Климат резко континентальный. Месторождение расположено на водоразделах рек Бол. Пенченга и Татарка. Район малонаселенный таежный со слабо развитой дорожно-транспортной сетью.

Татарское месторождение ниобия (Первая рудная зона) приурочено к региональному (Татарскому) разлому меридионального простирания (рис. 2.2.4). Карбонатиты связаны с линейными зонами щелочных метасоматитов. Рудная зона представляет собой субсогласную с вмещающими породами (мраморами, сланцами, ортоамфиболами) залежь длиной 4,5 км при ширине 80-450 м, сложенную чередованием линзовидных тел карбонатитов и метасоматитов, в основном доломит-арфедсонит-флогопитового состава [Быховский, Потанин, 2009; Труды..., 2008; Эпштейн и др., 2000].

Промышленное оруденение связано с зернистыми корами выветривания линейных карбонатитов, развивающихся по первичным рудам. Мощность КВ от 9-15 м на юге до 40-50 м на севере. Рудные тела в КВ наследуют контуры первичных руд, но содержание полезных компонентов в них в 2-4 раза выше. Выделено 18 рудных тел ленточной и линзовидной формы. Длина основных рудных тел составляет 680-2050 м, мощность 25-53 м, протяженность по падению 21-32 м. Руды рыхлые, влажные (естественная влажность 21,6-26,4%). Гидрогеологические условия простые.



Условные обозначения	
Четвертичные отложения	
Q_{IV}	Современные отложения. Пойменный и русловый аллювий – галечники, пески, глины, илы
Q_{III}	Верхнечетвертичные отложения нерасчлененные. Делювиально-пролювиальные отложения озерно-болотного типа, делювий пологих склонов. Супеси, суглинки с обломками пород
Протерозой	
PR_{kd1}²	Сухопитская серия, верхнего протерозоя. Нижняя подсвита. Пачка 2. Сланцы кварц серицитовые филлитизированные, кварциты, песчаники, гравелиты
PR_{kd1}¹	Сухопитская серия, верхнего протерозоя. Нижняя подсвита. Пачка 1. Сланцы кварц серицитовые филлитизированные с графитистым мат ериалом, конгломерато-брекчии
PR_{pn}⁴	Тейская серия, нижнего протерозоя. Пачка 4. Сланцы кварц-мусковит биотитовые, графитисто-кварц-слюдяные известковистые, мраморы кальцитовые, метавулканы
PR_{pn}³	Тейская серия, нижнего протерозоя. Пачка 3. Сланцы мусковит биотит-кварцевые, углеродистые, песчано-слюдяные, метавулканы
PR_{pn}²	Тейская серия, нижнего протерозоя. Пачка 2. Песчаники кварцитовидные, сланцы кварц-слюдяные, песчаные мраморы, метавулканы
Изверженные образования	
PR_{da}	Татарско-аяхтинский комплекс. Граниты, гранодиориты.
Ei-vPR_{pn}	Пенченгинский комплекс- компоненты (Ei), Карбонаты, метасоматы
vPR_{zin}	Индиглинский комплекс. Амфиболизированные габбро, габбро-диабазы, ортоамфиболиты (интрузивная фаза).
	Тектонические контакты: а) достоверные;
	б) предполагаемые
	Ореалы щелочного метасоматоза в породах.
	Татарское месторождение ниобия

Рис. 2.2.4. Схематическая геологическая карта района месторождения Татарское [Разработка программы..., 2014ф]

Месторождение детально разведано. По сложности геологического строения отнесено к 3-й группе классификации ГКЗ. По запасам ниобия, представляющего основную ценность в рудах, месторождение мелкое. С 2000 по 2013 гг. отрабатывалось на ниобий ОАО «Стальмаг».

Основные полезные минералы руд КВ – пирохлор, стронциопирохлор, колумбит, апатит, вермикулит, магнетит. Главным типом руд являются зернистые фосфатно-ниобиевые, в которых основной полезный компонент – ниобий, попутные – апатит, слюды и магнетит. Средние содержания полезных компонентов в рудах составляют: Nb_2O_5 – 0,74%, P_2O_5 – 8,77%, вермикулит – 11,12%, Fe – 0,82%.

Руды обогащались по комбинированной технологии, включающей гравитационно-флотационные методы на стадии первичного обогащения и магнитно-гравитационно-флотационные способы на доводочных операциях. Конечные продукты обогащения высоко-сортный пирохлоровый концентрат, содержащий 63-64% Nb_2O_5 , а также товарный апатитовый концентрат, содержащий ~40% P_2O_5 .

2.3. Результаты сравнительного анализа месторождений

Экономическая целесообразность освоения месторождений РФ, в том числе редкометалльных, определяется целым рядом показателей, среди важнейших из которых можно назвать: природно-территориальную доступность, высокая степень геологической изученности, относительно простой минеральный состав руд, из которых можно получать максимально ликвидные товарные продукты в целесообразном количестве, а следовательно, наличие рациональных технологических решений по обогащению и переделу руд, и др. [Мелентьев, 2011]. Поэтому для проведения сравнительного анализа рассмотренных выше месторождений ниобия составлена сводная таблица 2.3.1, включающая их основные характеристики.

Экспертная оценка каждой характеристики производилась на основе всестороннего анализа имеющегося материала по объектам по пятибалльной шкале, где 1 – самая низкая/отрицательная оценка признака, а 5 – самая высокая/положительная.

Из таблицы видно, что разрабатываемые зарубежные объекты расположены в хорошо освоенных районах, тогда как практически все отечественные месторождения ниобия находятся в мало освоенных или практически не освоенных районах. При этом по степени геологической изученности рассматриваемые отечественные месторождения практически не уступают зарубежным: Татарское и Белозиминское детально разведаны, а Большетагнинское и Чуктуконское – предварительно разведаны. Но на Чуктуконском месторождении оценочные работы проведены только на небольшой части, и поэтому балансовые запасы объекта составляют около 3% от его общих ресурсов. Томторское же месторождение из-за недоизученности технологических свойств руд и недостоверной экономической оценки отнесено к оцененным.

Таблица 2.3.1

Сравнительный анализ геологического строения и качества руд некоторых зарубежных и отечественных месторождений ниобия, генетически связанных с массивами УЩК

Характеристики	Arahá	Niobec	Большетагнинское	Белозиминское		Чуктуконское	Татарское	Томторское, уч. Буранный
				КВ	коренные			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расположение объ- екта, освоенность района	В 6 км от г. Араша шта- та Минас-Жерайс (Бра- зилия). Хорошо освоен	В 13 км от г. Сагеней в провинции Квебек (Ка- нада). Хорошо освоен	Ирк. обл., 180 км от ав- то и ж/д, 110 – от н.п. Практически не освоен, сейсмоопасен	Ирк. обл., 160 км от авто и ж/д, 90 – от н.п. Практически не освоен, сейсмо- опасен		Красн. край. 110 км от н.п., 180 – от пристани, 340 – от ж/д. Мало освоен	Красн. край. 110 км от ж/д, 150 – от при- стани. Достаточно освоен	Якутия. 140 км от н.п., 230 – от пристани. Мало освоен
	5	5	3	3	3	4	5	4
Степень геологиче- ской изученности	Детальная разведка. Разрабатывается СВММ	Детальная разведка. Разрабатывается Magris Resources Inc.	Оценочная стадия. На балансе основная часть запасов	Детальная разведка. На балансе основная часть запасов. Велась опытная добыча	Детальная разведка. На балансе основ- ная часть запасов	Оценочная стадия на небольшом участке объ- екта, остальное – пойс- ково-оценочные работы. Ведутся ГРП	Детальная разведка. До 2013 г. разраба- тывался ОАО «Стальмаг»	Предварительная раз- ведка. На балансе за- пасы небольшого уча- стка. Ведутся ГРП
	5	5	3	5	4	2	5	2
Сложность геоло- гического строения	Вторая	Вторая/третья	Вторая	Вторая	Вторая/третья. За- легал под КВ	Вторая	Третья	Вторая
	4	3	4	4	3	4	3	4
Nb как приоритет- ный полезный ком- понент	Основной Nb; попутные – TR, P, Ba (не извлекаются)	Основной Nb; попутные – TR, P (извлекаются)	Nb – основной, попут- ные – P, микроклин, U	Основные Nb, P; по- путные – Ta, TR	Основной Nb; по- путные – Ta, TR, P	Основные TR, Nb; по- путные – Fe, Mn, P	Nb основной, попут- ные – P, вермикулит	Основные Nb, TR, Y, Sc; попутные – Ti, V, P
	5	4	5	4	4	3	5	3
Содержание Nb в рудах, %	2,5	0,41	0,997	0,564	0,249	0,60	0,7587	6,71
	5	2	4	2	1	2	3	5
Масштаб месторо- ждения (по Nb)	Весьма крупное	Крупное	Среднее	Среднее	Крупное	Мелкое (на балансе - 3% от общих ресурсов)	Мелкое	Мелкое (на балансе - 9% от общих ресурсов)
	5	5	4	4	5	3	2	3
Морфология и раз- меры рудных тел	Пластообразный покров мощностью 100-200 м и более, округлой формы диаметром ~1800 м	Штоко-, трубообразные от крутопадающих до субвертикальных. По простирацию – до 760 м, по падению – более 750 м, мощность – от 45 до 185 м	Линзообразные наклон- ные залежи (с выходом на поверхность). По простирацию – 420-512 м, по падению – 330-400 м, мощность – 34-51 м	Пласто- линзообразные гори- зонтально ориентиро- ванные залежи. Уч. Основной – 3600×1100 м, мощность – 20,3 м	Линзовидная кру- топадающая. По простирацию – 100- 1400 м, по падению – 170-450 м, мощ- ность – 10-300 м	Линзообразная субгори- зонтальная. 1000×300 м, средняя мощность – 30 м	Линзовидная, ленто- видная крутопадаю- щая. По простира- нию – 667-2045 м, по падению – 2-88 м, мощность – 21-32 м	Субгоризонтальные залежи. Уч. Буранный – 2600×1400 м, средняя мощность – 10,1 м. Глубина залегания – от 8,5 до 160,0 м.
	5	4	5	5	3	5	4	5
Гидрогеологи- ческие и инженер- но-геологические условия	Простые. Породы рыхлые	Несложные. Породы скальные, крепкие	Несложные. Породы скальные, крепкие	Сложные: по площади протекает река. Породы рыхлые, влажность 23,5%	Средние. Породы скальные, крепкие	Не изучены, по площади протекает ручей. Породы рыхлые и полускальные, влажность 25%	Несложные. Породы рыхлые, влажность 21,5-26,5%	Несложные (многолет- няя мерзлота). Породы скальные, руды льди- стые, при оттаивании влажность 21%
	5	5	5	2	3	3	4	4
Технологическая изученность руд	Технология разработана и применяется. Конеч- ный продукт – FeNb (65% Nb)	Технология разработана и применяется. Конеч- ный продукт – FeNb (65% Nb)	Разработана технология с получением FeNb (65% Nb)	Апробированная тех- нология позволяет по- лучать FeNb (59% Nb)	Разработанная тех- нология позволяет получать Nb к-т (46,3% Nb ₂ O ₅)	Разработанная техно- логия позволяет получать ниобиевый продукт (25% Nb ₂ O ₅) либо Nb- Mn сплав	Технология разрабо- тана и применялась. Конечный продукт – FeNb	Разработанная техно- логия позволяет полу- чать оксиды Nb, Sc, PЗМ
	5	5	4	4	3	2	5	3
Экологическая безопасность	Повышенная радиоак- тивность руд	Повышенная радиоак- тивность руд	Повышенная радиоак- тивность промежуточ- ного продукта (Nb к-та)	Повышенная радиоак- тивность руд и к-та. При плавке – U-, Th- содержащие отходы	Повышенная ра- диоактивность Nb к-та	Повышенная радиоак- тивность руд. Твердые Th-содержащие отходы	Повышенная радио- активность Nb к-та. При плавке – Th- содержащие отходы	Повышенная радиоак- тивность руд. U-, Th- содержащие отходы
	4	4	4	3	4	3	3	3
Суммарная оценка	48	42	41	36	33	31	39	36

Все рассматриваемые месторождения, кроме Татарского, локализованы в массивах УЩК зонально-кольцевого строения. Татарский комплекс – типичная линейная зона щелочных метасоматитов и карбонатитов. По сложности геологического строения объекты отнесены ко второй, реже третьей группе. А вот масштаб месторождений (по балансовым запасам ниобия) сильно разнится: от крупных Белозиминского, Араша и Ниобек до мелких Татарского, Томторского, Чуктуконского. Содержание ниобия в рудах так же меняется в большом диапазоне: от весьма богатых руд Томтора и Араши (6,71% и 2,5% Nb_2O_5 , соответственно) до рядовых руд Белозиминского месторождения (0,35% Nb_2O_5 в среднем по объекту). При этом содержание Nb_2O_5 в рудах Большетагнинского месторождения, пригодных для отработки открытым способом, практически вдвое выше содержания ниобия в рудах месторождения Ниобек, отрабатываемого подземным способом. Другие отечественные месторождения ниобия (кроме некоторых участков коренных руд Белозиминского месторождения) также могут быть отработаны открытым способом.

Необходимо отметить, что количество других (кроме ниобия) основных и попутных полезных компонентов, а также вид последних играют важную роль при определении наиболее перспективного месторождения как источника получения ниобия. С одной стороны, комплексность руд может стать преимуществом объекта, с другой – недостатком. Учитывая, что ниобию в основном сопутствуют тантал и редкоземельные металлы, спрос на которые достаточно специфичен, такая комплексность руд – скорее недостаток. Если же в качестве попутных компонентов выступают востребованные продукты, применяемые в другой области промышленности и составляющие незначительную долю в стоимости товарной продукции, то это положительно сказывается на привлекательности объекта [Быховский, Воропаев, 2004; Быховский и др., 1997; Стратегия использования..., 1998]. По данному критерию отбора среди рассматриваемых отечественных месторождений лидируют Большетагнинское и Татарское.

Основным минералом-концентратором ниобия в рудах всех рассматриваемых месторождений является пироклор. И практически для всех них технология получения ниобиевой продукции в общем виде включает глубокое обогащение (часто магнитными и флотационными, реже гравитационными методами) и последующие гидро- и пирометаллургические переделы продуктов обогащения [Курков, Котова, 2007; Кусевич и др., 2009; Кушпаренко, Петрова, 1994; Лихникевич и др., 2013]. При этом технологические свойства руд месторождений Араша, Сент-Оноре и Татарского месторождения хорошо изучены, а эффективность разработанных технологий подтверждена в ходе эксплуатации объектов. Для переработки руд Большетагнинского и Белозиминского месторождений разработаны и испытаны в укрупненно-лабораторных условиях технологические схемы, позволяющие получить в качестве основного товарного продукта феррониобий стандартных марок. Для руд Чуктуконского и Томторского месторождений пред-

ложены различные технологии переработки, позволяющие получать ниобиевые концентраты различного качества либо оксид металла, но их экономическая эффективность в современных условиях в большинстве случаев не обоснована [Определение перспектив..., 2000ф].

Еще одним важным для редкометалльных производств факторов является их экологическая безопасность. Основной особенностью редкометалльных минералов является постоянное присутствие в них радиоактивных элементов (уран, торий) в виде изоморфных примесей [Кузькин, 2011; Россман и др., 2012]. Поэтому при складировании отходов обогащения, возникает потенциальная опасность повышения радиоактивного фона местности, а повышенная радиоактивность промежуточных и конечных продуктов приводит к необходимости принятия дополнительных мер по защите окружающей среды. В связи с этим рассматриваемые месторождения также оценены по экологическому фактору.

Таким образом, произведено сравнение анализируемых месторождений по каждому критерию оценки и экспертно проставлены соответствующие баллы. В результате сравнительного анализа объектов по каждому из них была рассчитана суммарная балльная оценка. Ее максимальной величиной (48 баллов) характеризуется месторождение Араша (Бразилия) – объект, обеспечивающий более 80% мирового спроса на ниобий. Второе место по сумме баллов занимает месторождение Ниобек (Канада), также эффективно разрабатываемое в настоящее время и обеспечивающее до 10% мировой потребности в ниобии.

Первое место среди анализируемых отечественных месторождений ниобия принадлежит Большетагнинскому месторождению (41 балл). С небольшим отставанием за ним следует Татарское месторождение (39 баллов), уступившее ему, в первую очередь, за счет незначительных запасов. Далее по порядку следуют участок Буранный Томторского месторождения, коры выветривания и коренные руды Белозиминского месторождения, Чуктуконское месторождение.

На основе проведенного экспертно-балльного анализа Большетагнинское месторождение ниобия (Иркутская обл.) признано наиболее перспективным источником ниобия среди других отечественных объектов в современных условиях.

Большетагнинское месторождение по своим геологическим характеристикам обособлено от всех прочих рассмотренных ниобиевых месторождений, руды его относятся к новому потенциально-промышленный типу – в силикатных метасоматитах карбонатитовых комплексов преимущественно с очень тонкой вкрапленностью рудных минералов. По сравнению с другими отечественными месторождениями ниобия и зарубежным разрабатываемым месторождением Ниобек оно характеризуется достаточно высоким содержанием Nb_2O_5 .

Другим преимуществом руд Большетагнинского месторождения является их монометалльность: основным полезным компонентом руд является ниобий, попутными – фосфор и микроклин. Объемы производства основной товарной продукции – феррониобия не будет зави-

сеть от объемов производства других продуктов, таких как редкие земли и тантал в других месторождениях; а производимые попутно апатитовый концентрат, дефицитный для районов Сибири и Дальнего Востока, и высококачественный полевошпатовый продукт позволят получить дополнительную прибыль.

Морфология и условия залегания рудных тел, инженерно- и горно-геологические условия месторождения благоприятны для его отработки открытым способом, характеризующемся простотой и дешевизной.

Для руд месторождения, с учетом их уникального вещественного состава и изменчивости технологических свойств, разработана и апробирована в укрупненно-лабораторном режиме схема эффективного обогащения и последующего передела концентратов с использованием инновационного комплекса технологических решений. При этом вопрос радиоактивности конечного продукта решен путем предварительного извлечения и получения дополнительного попутного продукта – уранового концентрата.

Масштаб месторождения позволяет осуществлять его отработку в течение около 40 лет при производительности, соответствующей текущей потребности России в феррониобии, что позволит не только окупиться инвестициям, но и достичь инвестору существенного дохода даже при учете строительства металлургического производства.

В комплексе данные характеристики позволяют осуществить обоснованный выбор Большетагнинского месторождения ниобия в качестве наиболее перспективного в настоящее время отечественного ниобиевого объекта, отработка которого позволит полностью освободить металлургическую промышленность России от импортозависимости по феррониобию и осуществлять производство другой ликвидной продукции.

Таким образом обосновано первое научное положение диссертации **«Совокупность особенностей геологического строения и минералого-технологических характеристик руд нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд в силикатных метасоматитах карбонатитового комплекса позволяет рекомендовать Большетагнинское месторождение как наиболее перспективный в современных условиях источник получения ниобия в России».**

3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ С РУДАМИ НОВОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ТИПА

3.1. Географическое и административное положение

Большеэтагнинское месторождение расположено в предгорной части Восточного Саяна. Административно находится в пределах Тулунского района Иркутской области в 160 км от города и одноименной станции Восточно-Сибирской железной дороги Тулун, в 19 км от бывшего поселка Белозиминский. Ближайший населенный пункт – с. Уйгат, расположенное в 90 км от Белозиминского месторождения (рис. 3.1.1).

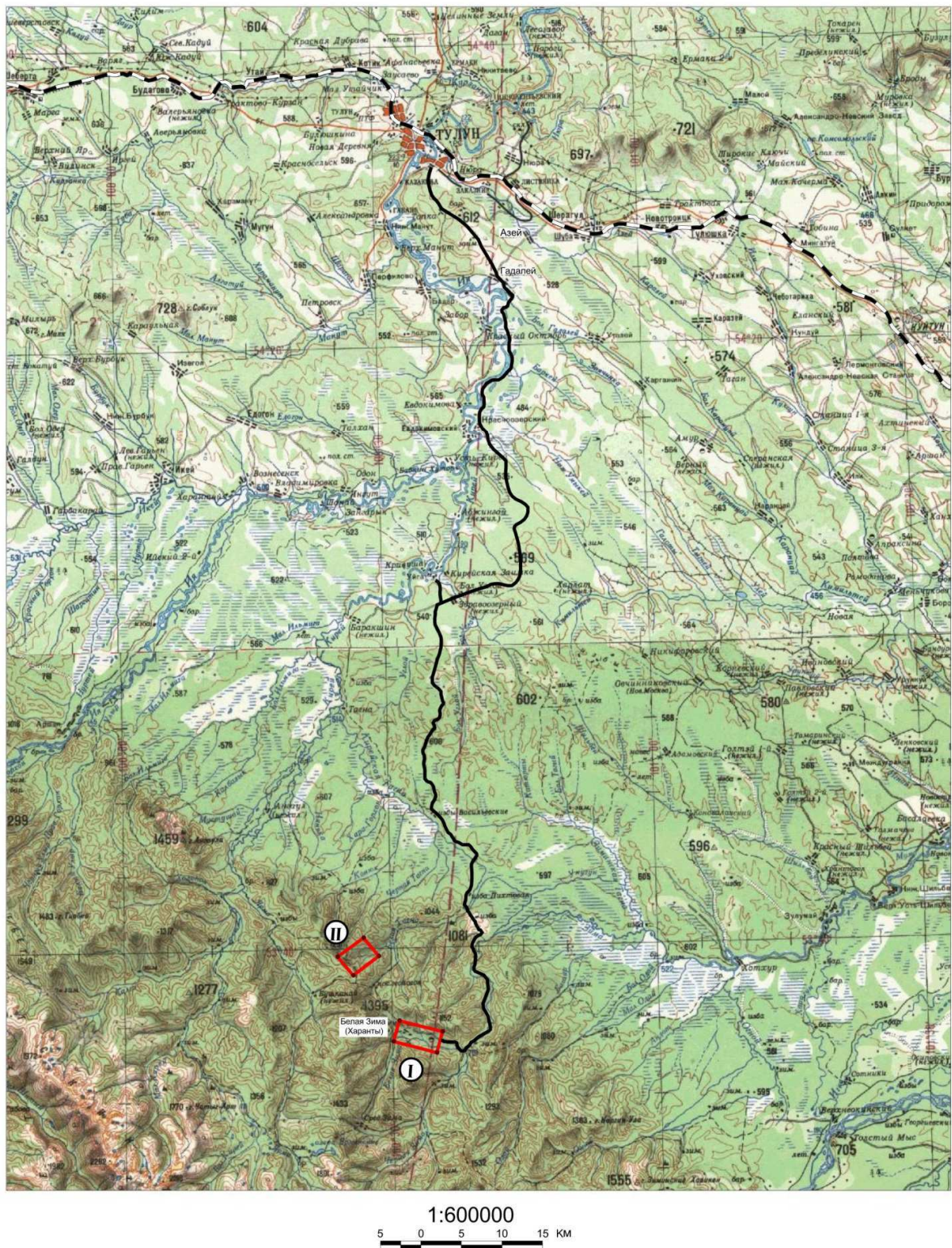
Район характеризуется среднегорным расчлененным рельефом. Гидросеть района принадлежит бассейнам рек Ярма и Белая Тагна. Замерзание рек района начинается в первой декаде октября. Вскрытие рек происходит во второй половине апреля. Климат района резко континентальный с продолжительной и холодной зимой. В районе месторождения выпадает от 543 до 958 мм осадков в год. Вечная мерзлота носит островной характер, глубина встречи многолетней мерзлоты 3,5-8,4 м, сезонное промерзание почвы до 3 м.

По сейсмичности район относится к семибалльной зоне.

Горно-геологические условия месторождения позволяют вести разработку открытым способом. Породы месторождения относятся к III категории (крепкие). Гидрогеологические условия месторождения при отработке его карьером простые. С инженерно-геологической позиции условия разработки месторождения являются благоприятными [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф].

Район расположения месторождения характеризуется развитой инфраструктурой. В Иркутской области достаточно развитая транспортная система, в ней присутствуют все виды транспорта: воздушный, водный, железнодорожный, автомобильный. Через территорию Тулунского района проходят Транссибирская железнодорожная магистраль, федеральная автодорога М-53 и автодорога Тулун – Братск (территориальная дорога Р-419). В г. Нижнеудинск имеется аэропорт, в г. Тулун – аэродром. В районе города Тулун проходит высоковольтная ЛЭП-500 Иркутск-Братск.

Связь с бывшим поселком Белозиминским осуществляется по автомобильной дороге: первые 26 км от г. Тулун в сторону месторождения – шоссейная дорога с щебеночным покрытием, далее до пос. Уйгат (44 км) – улучшенная грунтовая автодорога (от г. Тулун до пос. Уйгат ходят рейсовые автобусы); дальше до бывшего поселка Белозиминск (90 км) – автодорога, местами сильно разрушенная. Проезд от пос. Белозиминск до Большеэтагнинского месторождения возможен автомобильным транспортом повышенной проходимости по грунтовой дороге (19 км).



① Белозиминское месторождение

② Большетагинское месторождение

Рис. 3.1.1. Обзорная схема района месторождения

3.2. Геологическое изучение и строение района

Планомерное геологическое изучение района началось с 1952 года после открытия партией № 1 Ферганской экспедиции ВИМСа (начальник партии В.П. Нефедов) Белозиминского

месторождения, связанного с одноименным массивом ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК).

Большетагнинское месторождение открыто в 1975 г. Урикско-Ийской партией при проведении ГДП-50 одноименного массива. В 1988-1992 гг. партией Ангарской ГРЭ ГПП «Иркутскгеология» на месторождении проведены поисково-оценочные работы, по результатам которых в авторском варианте подсчитаны запасы Nb_2O_5 и P_2O_5 кат. C_2 и прогнозные ресурсы кат. P_1 , характеризующие объект как средний по масштабам с богатыми рудами [Отчет о результатах..., 1993ф]. Материалы подсчета запасов на экспертизу в ГКЗ не представлялись.

В 1992 г. ФГУП «ВИМС» составлены «Технико-экономические соображения для обоснования предварительной разведки Большетагнинского месторождения», однако работы на месторождении были свернуты [Быховский и др., 2000, 2002].

Геологоразведочные работы на месторождении возобновлены в 2008 г.: в период 2008-2012 гг. ФГУП «ВИМС» при участии ООО «Сосновгео» произведен необходимый для завершения оценочной стадии объем буровых и горных работ, при участии ОАО «Гиредмет», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ООО «Радос», ООО «Evanko ltd.», ЗАО «Урал-Омега» разработана технология переработки руд на основе данных малообъемного технологического опробования, подготовлено ТЭО разведочных кондиций с подсчетом запасов полезных ископаемых. В результате проведенных работ в 2012 г. Большетагнинское месторождение было поставлено на государственный баланс.

Зиминский район, в котором находится Большетагнинское месторождение, расположен в краевой, юго-западной, части Сибирской платформы и тяготеет к зоне сочленения последней с Алтае-Саянской складчатой областью (рис. 3.2.1, А). Основным тектоническим элементом Сибирской платформы, вмещающим месторождение, является Урикско-Ийский прогиб. С северо-востока прогиб ограничен Андотским поднятием, с юго-запада Главным Саянским разломом, являющимся краевым швом Сибирской платформы [Быховский, Потанин, 2009; Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф].

Урикско-Ийский прогиб сложен отложениями сублукской (PR_1^{21}) и калбазыкской (R_1) серий. Ширина прогиба в пределах Зиминского района 50-55 км, простирание пород северо-западное. Отложения смяты в линейные складки с углами падения от 30° до 80° (рис. 3.2.1, Б).

Интрузивные образования ранепротерозойского возраста (PR_1^{21}) представлены пластообразными телами метадиабазов арбанского комплекса, а также более поздними батолитовыми интрузиями саянского комплекса – порфировидными гранитами (преобладают), гранодиоритами, лейкогранитами и пегматоидными гранитами. Выше сублукской серии со стратиграфическим несогласием залегают отложения калбазыкской серии (R_1). В ее составе выделяются (от древней к молодой): ингашинская, калбазыкская и ермошихинская свиты.

Ингашинская свита сложена песчаниками с прослоями гравелитов, конгломератов, хлорит-серицитовых и глинистых сланцев. Мощность 2200-2500 м. Породы калбазыкской свиты развиты за пределами района и представлены эффузивами и туфами различного состава. Отложения ермосохинской свиты слагают узкий (200 м – 2-3 км) и протяженный (около 70 км) тектонический блок, контролируемый Белозиминской зоной разломов и приуроченный к контакту далдарминской и урикской свит раннего протерозоя (рис. 3.2.1, Б). Свита сложена конгломератами, гравелитами, песчаниками и алевrolитами. Цвет пород серый, зеленый, редко вишнево-красный. Мощность составляет 1300-1800 м.

Интрузивные образования позднего протерозоя представлены гранодиоритами и плагиогранитами чернозиминского комплекса (R_1); многочисленными дайкообразными телами долеритов, габбро-долеритов нерсинского комплекса (R_3); а также массивами ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) зиминского комплекса (V) – Белозиминский, Среднезиминский и Большетагнинский массивы. Массивы УЩК располагаются в осевой части Урикско-Ийского прогиба и контролируются крупными зонами разломов: Белозиминским и Среднезиминским. Абсолютный возраст пород колеблется в пределах 650-700 млн. лет.

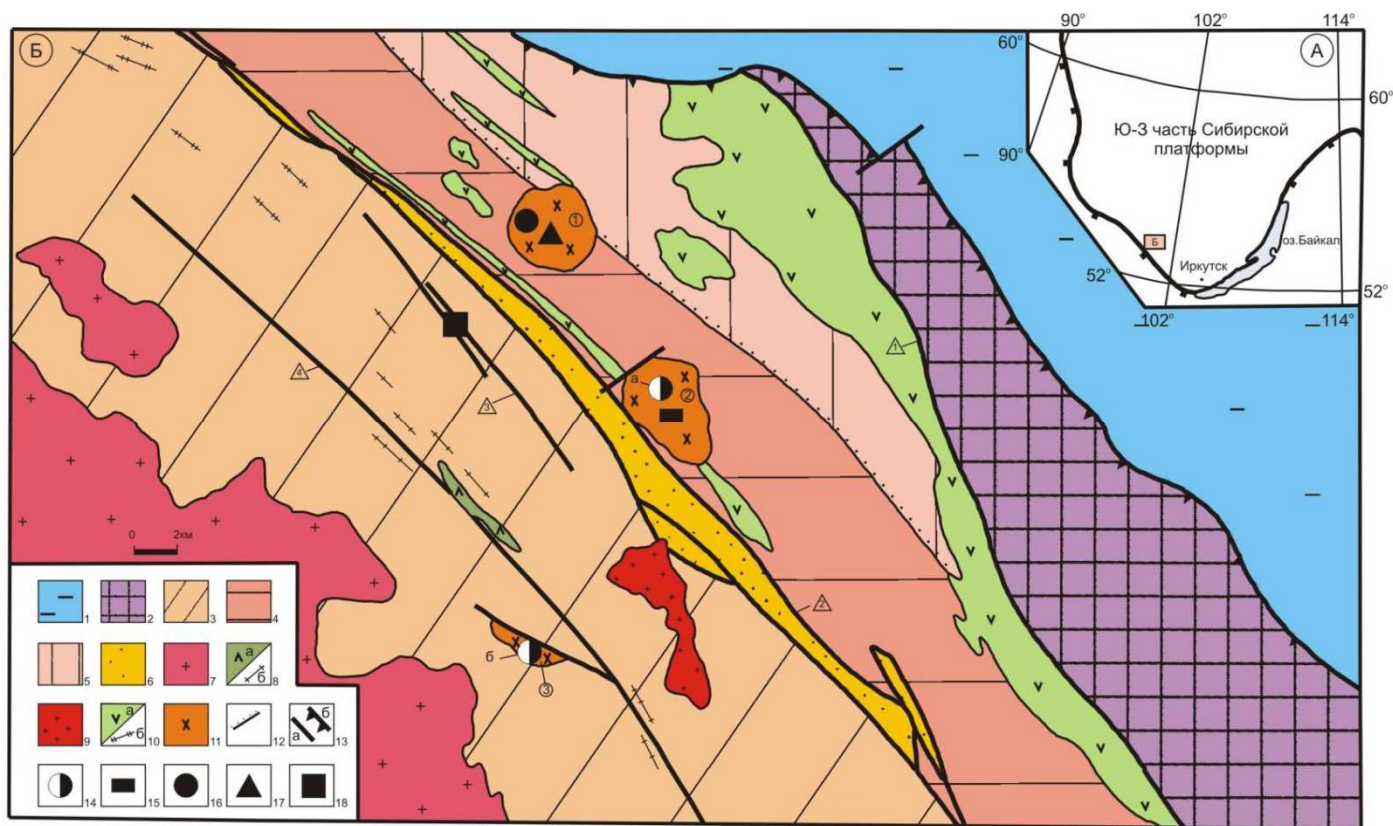
Массивы УЩК сложены пироксенитами, ийолит-мельтейгитами, сиенитами, нефелиновыми сиенитами, карбонатитами, дайками и трубками пикритовых порфиритов-альнеитов. Карбонатиты – многостадийные образования. На примере Белозиминского массива выделяются 4 стадии их формирования [Пожарицкая, Самойлов, 1972]: 1) крупнозернистые кальцитовые с апатитом, 2) пегматоидные форстерит-диопсид-кальцитовые с апатитом, флогопитом, пироксеном и гатчеттолитом, 3) мелкозернистые амфибол-кальцитовые с апатитом и пироксеном, 4) анкеритовые с редкоземельной минерализацией (паризит, бастнезит, монацит).

В пределах массивов УЩК карбонатиты образуют штокообразные тела, площадью до 9,6 км² и дугообразные жилы (в силикатных породах) мощностью до 100 м и протяженностью до 1 км. В карбонатитах располагаются фосфор-редкометалльные рудные тела. Исключением является Большетагнинский массив, в пределах которого богатые руды приурочены к силикатным породам – микроклинитовым и биотитовым метасоматитам.

3.3. Металлогеническое районирование и полезные ископаемые района

В соответствии с [Беневольский и др., 2010] территория, на которой располагаются Белозиминский, Среднезиминский и Большетагнинские массивы УЩК, в металлогеническом отношении относится к категории рудных узлов. Площадь Зиминского рудного узла составляет ~300 км². Площади массивов УЩК образуют рудные поля, размеры их $n \cdot \text{км}^2 - n \cdot 10 \text{ км}^2$.

Месторождениями являются рудные зоны и участки рудоносных кор выветривания, имеющие промышленное значение, площади их от $0,1 \cdot n$ до $n \cdot \text{км}^2$ соответственно.



А – положение Зиминского района в пределах Сибирской платформы.

Б (врезка) - 1 – чехол платформы (V-J₂); фундамент платформы: 2 – Андотское поднятие – камчадалская свита и онотский комплекс гранитоидов (PR₁¹); Урикско-Ийский прогиб. Сублукская серия (PR₁²); 3 – большереченская и дадарминская свиты нерасчлененные, 4 – урикская свита; калбазыкская серия (R₁): 5 – ингашинская свита, 6 – ермосохинская свита; интрузивные образования: 7 – саянский комплекс (PR₁²) – граниты, гранодиориты, лейкограниты, 8 – ангаульский комплекс (R₁) – диабазы, габбро-диабазы, 9 – чернозиминский комплекс (R₁) – гранодиориты, плагиограниты, 10 – нерсинский комплекс (R₃) – диабазы, габбро, габбро-диабазы, 11 – зиминский комплекс (V) – мельтейгиты, ийолиты, сиениты, щелочные метасоматиты (альбититы, микроклиниты, слюдиты), карбонатиты; 12 – границы несогласного залегания пород, 13 – тектонические нарушения: разломы (а), надвиги (б).

Месторождения. Фосфор-редкометалльные (Nb, Ta, TR): 14 – в карбонатитах (а – Белозиминское, б – Среднезиминское), 15 – в корках выветривания карбонатитов (Белозиминское), 16 – фосфор-ниобиевое в щелочных метасоматитах – микроклинитах и слюдитах (Большетагнинское), 17 – флюоритовое в карбонатитах (Большетагнинское), 18 – торий-редкоземельное рудопроявление (Ярминское).

Массивы УЩК (цифры в кружках): 1 – Большетагнинский, 2 – Белозиминский, 3 – Среднезиминский.

Зоны разломов (цифры в треугольниках): 1 – Тогерская, 2 – Белозиминская, 3 – Ярминская, 4 – Среднезиминская.

Рис. 3.2.1. Схема тектонического строения и размещения полезных ископаемых Зиминского рудного узла
[Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф]

Главное значение в Зиминском районе имеют полезные ископаемые, связанные с массивами УЩК. В пределах Белозиминского массива разведаны месторождения в карбонатитах и корах выветривания карбонатитов. Основные полезные компоненты – Nb, P; попутные – Ta и TR. Содержание Nb_2O_5 в карбонатитовых рудах наиболее перспективного Южного участка – 0,25%, P_2O_5 – 3,73% (запасы категории C_1+C_2). В рудах коры выветривания карбонатитов содержание Nb_2O_5 – 0,56%, P_2O_5 – 14,32% (запасы категорий $B+C_1$). Запасы коренных руд и руд коры выветривания учтены Государственным балансом.

В пределах Среднезиминского месторождения наибольшую ценность имеют гатчетолитовые руды в карбонатитах. Среднее содержание Ta_2O_5 здесь 0,02%, Nb_2O_5 – 0,09%, содержание попутного компонента U – 0,01%. Месторождение числится в Государственном балансе запасов (ГБЗ) [Быховский, Потанин, 2009].

В Большетагнинском массиве УЩК выявлены одноименные месторождения ниобия и флюорита. Большетагнинское месторождение ниобия в отличие от всех других месторождений, связанных с массивами УЩК, расположено не в карбонатитах, а в силикатных породах – микроклинитах и слюдитах. Главным полезным минералом является пироксид, попутное значение имеют микроклин и апатит. Руды характеризуются высокими содержаниями Nb_2O_5 – 0,966%, содержание P_2O_5 – 3,94%. Месторождение числится в ГБЗ.

Одноименное флюоритовое месторождение расположено в центральной части карбонатитового штока. Выявлены две рудные зоны линзообразной формы. Зона № 1 имеет протяженность 385 м, средняя мощность 30 м; сложена мелкозернистым карбонатитом, содержащим тонкую (<1 мм) вкрапленность фиолетового флюорита, содержание флюорита 23,8-30,4%. Зона № 2 имеет длину около 800 м, средняя мощность 20 м, сложена средне-крупнозернистым карбонатитом с вкрапленностью флюорита, окрашенного в светлые тона фиолетового, розового и желтого цветов. Содержание флюорита неравномерное и колеблется от 5 до 50% [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2007].

Кроме отмеченных месторождений, расположенных в пределах массивов УЩК в Зиминском районе, известно недоизученное Ярминское торий-редкоземельное рудопроявление. Оно расположено в породах далдарминской свиты и приурочено к зонам дробления. В зонах дробления проявлены гидротермально-метасоматические процессы, выражающиеся в развитии микроклина, кварца, альбита, карбоната. Рудная минерализация представлена ферриторитом, торитом, ксенотимом, реже пироксидом, колумбитом, бастнезитом, цирконом, апатитом. Выявлено пять минерализованных зон, длина их колеблется от 2 до 7 км. Средние содержания TR_2O_3 – 0,191%, ThO_2 – 0,106%. Руды характеризуются повышенными концентрациями иттрия и редкоземельных элементов средней (самариевой) подгруппы. Содержание иттрия в процентном отношении от $\sum TR$ изменяется от 13 до 40%, европия от 1 до 6%, что является очень высоким.

Помимо отмеченных рудных объектов, в районе разведаны месторождения песчано-гравийных материалов, глин, песчаников и др. строительных материалов.

3.4. Основные черты геологического строения и рудоносности Большетагнинского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов

Массив залегает в отложениях урикской и ингашинской свит выполняющих Урикско-Ийский грабен-синклиний. Он имеет округлую форму с диаметром около 4 км, асимметричное концентрически-зональное строение и сложен силикатными породами и карбонатитами. Площадь массива 13,8 км² (см. рис. 2.1.2).

Силикатные породы, представленные магматическими (мельтейгиты-ийолиты, сиениты) и метасоматическими (микроклиниты, слюдиты) образованиями, слагают дугообразную полосу в северной и юго-восточной частях массива и составляют около 70% его площади. Мельтейгиты-ийолиты наиболее ранние. Они калишпатизированы, карбонатизированы и сохранились в виде крупных останцов среди более поздних пород. Микроклиниты и сиениты среди силикатных пород преобладают. Они образуют серию линзообразных тел залегающих конформно по отношению к контактам массива. Для микроклинитов характерна красная окраска; структура их средне-крупнозернистая. В дугообразных зонах катаклаза микроклиниты интенсивно рекристаллизованы с образованием разномасштабных порфирохлоритовых мелко-тонкозернистых структур. К рекристаллизованным (мелко-тонкозернистым) микроклинитам приурочены рудные зоны с апатит-пироксеновым оруденением.

Карбонатиты слагают эксцентрично смещенный к западу крупный шток площадью ~3,8 км², а также дугообразные залежи расположенные среди ультраосновных щелочных пород.

В пределах массива УЩК, особенно среди карбонатитов, развиты дайки пикритовых порфиритов, слюдяных пикритовых порфиритов и кимберлитоподобных пород.

В металлогеническом отношении площадь Большетагнинского массива, как отмечалось выше, является редкометалльным рудным полем. Площадь рудного поля 13,8 км², в его пределах выявлено 13 рудных зон с апатит-пироксеновым оруденением. Из них в силикатных породах (микроклинитах и слюдитах) расположено 9 рудных зон, в т.ч. и зона № 1 – собственно Большетагнинское месторождение ниобия; в карбонатитах 1-й стадии – 4 рудные зоны. Кроме того, в рудном поле известно месторождение флюорита связанного с карбонатитами 2-й стадии.

3.5. Геология Большетагнинского месторождения ниобия

3.5.1. Геологическое строение

Структурно-тектоническая позиция

Большетагнинское месторождение располагается в пределах одноименного массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов и приурочено к зоне контакта карбонатитового штока

с силикатными породами. Рудовмещающими породами являются микроклиниты и слюдиты. Естественные границы месторождения: с юга – карбонатиты, с севера и юго-запада – выходы ультраосновных щелочных пород; на северо-западном фланге геологическая граница не выражена и проведена по выклиниванию оруденения. Площадь месторождения 0,173 км². Аномалия ориентирована в северо-восточном направлении, имеет размеры 1000×750 м и вероятно обусловлена повышенным содержанием в рудах сульфидов железа.

Геологическое строение

В строении месторождения принимают участие следующие породы и группы пород (естественные ассоциации): 1) ультраосновные щелочные породы; 2) красноцветные микроклиниты; 3) слюдиты – серые микроклиниты; 4) карбонатиты; 5) красноцветные микроклиниты – апатит-эгириновые породы. Общее простирание пород северо-восточное, падение северо-западное. Угол падения пород изменяется от 30° на северо-восточном фланге месторождения до 70° на юго-западном.

По расположению относительно ассоциации «слюдиты – серые микроклиниты» условно выделяются поверхностная (располагающаяся выше отмеченной ассоциации) и глубинная (располагающаяся ниже ее) зоны месторождения. Поверхностная зона сложена ультраосновными щелочными породами и красноцветными микроклинитами.

Ультраосновные щелочные породы (УЩП) являются наиболее древними образованиями. Они слагают линзообразные залежи и тела неправильной формы, часто в виде перемычек, разделяющих выходы микроклинитов. Породы нацело изменены: сохранились лишь реликты первичной текстуры, а все минералы нацело замещены новообразованными: серицитом, хлоритом, карбонатом; иногда отмечается биотитизация и микроклинизация. По данным опробования УЩП характеризуются низкими содержаниями ниобия (0,03-0,05% Nb₂O₅) и являются безрудными породами, часто, ограничивающими развитие рудных тел.

Наиболее широко в поверхностной части месторождения развиты микроклиниты. Они образуют линзообразное тело мощностью от 70 до 150 м, ограниченное линзами УЩП (висячий блок) и слюдитов (лежачий блок). Микроклиниты в основном тонкозернистые, красные, розовые, иногда красновато-серые (сиреневые). Основным породообразующим минералом является микроклин. По текстурным особенностям среди них выделяются массивные и брекчиевидные разновидности. Массивные микроклиниты преобладают.

Микроклиниты являются рудовмещающими породами. Ниобиевое оруденение развито практически на полную мощность линзы микроклинитов и сверху ограничивается телами УЩП.

Контакты микроклинитов с вмещающими породами характеризуются следующими особенностями. Висячий контакт (с УЩП) относительно четкий. Лежачий (со слюдитами) – постепенный, здесь часто выделяются промежуточная (гибридная) зона в которой микроклиниты на-

сыщены большим количеством (20-70% от общего объема породы) гнездообразных включений слюдитов. Мощность гибридных пород колеблется от 2-3 до 25 м. Цвет микроклинитов в промежуточной зоне, как правило, красновато-серый (сиреневый).

Ниже микроклинитов расположен еще один рудоносный комплекс пород, состоящий из слюдитов и серых микроклинитов и являющийся условной границей, разделяющей поверхностную и глубинную части месторождения.

Слюдиты – породы черного цвета, состоящие в основном из биотита. По величине листочков биотита различаются мелко-среднезернистые и тонкозернистые разновидности. В ряде случаев биотит нацело замещен бурой разновидностью хлорита, в связи с чем существенно изменяются его состав и состав породы в целом: в хлоритизированных слюдитах уменьшаются содержания F (в 70-80 раз), Al_2O_3 (в 2 раза), K_2O (в 3 раза). Содержания Nb_2O_5 и P_2O_5 существенно не меняются. Иногда слюдиты образуют относительно чистые (без существенной примеси других пород) прослои, характеризующиеся, как правило, высокими, до 2-3% и более, содержаниями Nb_2O_5 . Местами в слюдитах появляется существенная примесь «серых микроклинитов» и карбонатитов. Замещение слюдитов этими образованиями начинается с появления интерстиционных включений размером ~1 мм, развитых между листочками биотита. При увеличении интенсивности метасоматоза происходит образование гнезд и линз «серых микроклинитов» и карбонатитов, составляющих до 40-60% объема породы. Выделяются также линзы мощностью до 10 м, состоящие в основном из «серых микроклинитов», часто карбонатизированных. Содержание ниобия в прослоях, содержащих значительное количество «серых микроклинитов», как правило, ниже по сравнению с чистыми слюдитами. Характерной особенностью этой группы пород является наличие большого количества сульфидов железа (пирита и пирротина), местами образующих гнезда колчеданных руд. Группа слюдитов – «серых микроклинитов» слагает сложно-построенное уплощенное линзовидное тело, протяженностью около 600 м и мощностью от 35 до 110 м, располагающееся между красноцветными микроклинитами и карбонатитами.

Оруденелой является вся слюдитовая залежь или ее верхняя часть, примыкающая к микроклинитам. Ниобиевое оруденение без перерыва переходит из слюдитов в микроклиниты, образуя единую рудную залежь.

Глубинная зона месторождения сложена красноцветными микроклинитами и апатит-пироксеновыми породами. В микроклинитах глубинной зоны выявлены второстепенные рудные тела №№ 8, 13 с запасами кат. С₂, а также рудное тело 4 с прогнозными ресурсами кат. Р₁. В апатит-пироксеновых породах не выявлено самостоятельных рудных тел, но на юго-западном фланге месторождения они входят в состав рудного тела 3, слагая его подошвенную часть.

Карбонатиты по геологическому положению подразделяются на две группы: 1) магматические, 2) метасоматические.

Магматические карбонатиты развиты в южных частях месторождения и являются краевой частью карбонатитового штока. Они представлены белыми, светло-серыми, массивными, иногда неяснополосчатыми кальцитовыми карбонатитами. Характерной примесью является гематит, образующий послойные и гнездообразные скопления. Карбонатиты имеют интрузивные контакты со всеми породами и образуют в них жилы и апофизы. Породы характеризуются очень низкими содержаниями Nb_2O_5 (сотые, редко первые десятые доли процента) и рудных тел с промышленным оруденением в них не выявлено.

Метасоматические карбонатиты развиты в основном в пределах слюдитовой залежи по серым микроклинитам, дайкам порфириров и, вероятно, по слюдитам. Они содержат реликты исходных пород и вследствие этого имеют повышенную твердость; цвет пород серый с зеленоватым оттенком. При полевых наблюдениях практически неотличимы от серых микроклинитов. Образуют линзо- и жилообразные залежи. По составу разделяются на анкеритовые (преобладают) и сидеритовые разновидности. Содержания ниобия в анкеритовых карбонатитах низкие (сотые доли %), а в сидеритовых – высокие (0,6-0,88% Nb_2O_5).

Зона гипергенеза

В приповерхностной части месторождения проявлены гипергенные процессы. Микроклиниты здесь за счет гидратации оксидов железа приобретают коричневую окраску, содержат большое количество пустот (ячеистая текстура), образованных вследствие выщелачивания сульфидов и карбонатов. Местами по трещинам развиваются корочки гидроокислов железа. Но в целом степень изменения пород незначительна и соответствует начальной стадии корообразования. Мощность зоны проявления гипергенных процессов в микроклинитах колеблется от первых метров до 50-60 м.

Слюдиты в зоне гипергенеза превращены в щебнистую, легко разрушающуюся массу. Ийолиты в зоне гипергенеза ведут себя по-разному. В случае слабых изменений (биотитизации, карбонатизации) они являются устойчивыми породами, а при интенсивно проявленной биотитизации - легко разрушаются с образованием щебнистой массы.

На северо-западном фланге месторождения по данным предшественников [Отчет о результатах..., 1993ф], вдоль долины ручья, развита линейная кора выветривания, представленная охристо-глинисто-дресвяным материалом бурого, кирпично-бурого цвета. Мощность ее от 25 до 95 м, протяженность около 600 м. Развита кора в основном по микроклинитам, в меньшей степени по карбонатитам и ийолитам. Увеличение содержания ниобия в коре не происходит, а концентрация P_2O_5 в нижних частях коры выветривания возрастает до 11,3% и в среднем составляет 5,95%.

Тектонические нарушения

Наиболее крупное тектоническое нарушение, местами отделяющее карбонатиты от пород силикатного комплекса, фиксируется в юго-восточной части месторождения. Оно представлено зоной брекчирования северо-восточного простирания мощностью 1,5-3,5 м с падением на северо-запад под углом 70-80°.

Выявлены зоны трещиноватости северо-восточного простирания мощностью 5-8 м, местами до 15-20 м. Редко в микроклинитах отмечались открытые трещины, фиксируемые провалами бурового снаряда на 0,5-1,0 м. В слюдитах развиты зеркала скольжения. На северо-западном фланге участка, за пределами месторождения, по зоне трещиноватости, как отмечалось выше, развита линейная кора выветривания.

Во всех отмеченных случаях повышения содержания ниобия в зонах брекчирования и трещиноватости не происходит. Возраст зон трещиноватости пострудный, т.к. неоднократно отмечалось дробление ими апатит-пироксеновых прожилков. Соответственно, в размещении ниобиевого оруденения зоны линейного катаклаза роли не играют.

3.5.2. Вещественный состав и природные типы руд

Ниобиевое оруденение не имеет четких геологических границ, поэтому оконтуривание рудных тел проведено по бортовому содержанию основного полезного компонента (0,3% Nb₂O₅). Оконтуренные таким образом рудные тела располагаются, в основном, в микроклинитах поверхностной зоны и в слюдитах.

По петрографическому составу и условиям залегания на месторождении выделяются два природных типа руд: микроклинитовый и слюдитовый. Эти разновидности образуют обособленные геологические тела, картирующиеся на плане и разрезах. В пределах слюдитового типа руд, по результатам минералогического картирования профилей, пробуренных в 2008 г. ФГУП «ВИМС» (профиля 5 и 7), выделены два сорта: карбонатит-слюдитовый и собственно слюдитовый, отличающиеся друг от друга по количеству карбонатитовой составляющей (в виде жил и гнезд).

Микроклинитовая руда из зоны гипергенеза представлена серовато-розоватыми, бурыми и кирпично-красными микроклинитами с широко развитыми вторичными пористыми и кавернозными текстурами. Структурные особенности выветрелых микроклинитов не отличаются от таковых свежих пород. Это породы, состоящие из агрегата зёрен микроклина тонко-, мелкозернистого, роговикового строения, включающего зёрна и гнёзда апатита и карбонатных минералов, вкрапленность пирротина, реже пирита, а также гематита. На месте выщелоченных карбонатных минералов образуются пористые текстуры микроклинитовых руд и гидроксиды железа, развивающиеся как по железистым карбонатам, так по сульфидам. Главный рудный минерал ниобия – пироксенол, образует тонкую вкрапленность в микроклинитовом агрегате (размер зёрен

обычно $<0,1$ мм), апатит-пирохлоровые, реже практически мономинеральные прожилки мощностью 0,1-1 мм (рис. 3.5.1, а).

Переходная (карбонатит-слюдитовая) руда представлена первичными и слабо окисленными силикатными метасоматитами брекчиевидного облика, имеющими микроклин-биотитовый состав и секущимися многочисленными жилами и прожилками анкерит-сидеритовых карбонатитов. Руды содержат как вкрапленное, так и прожилково-гнездовое пирохлоровое оруденение (рис. 3.5.1, б).

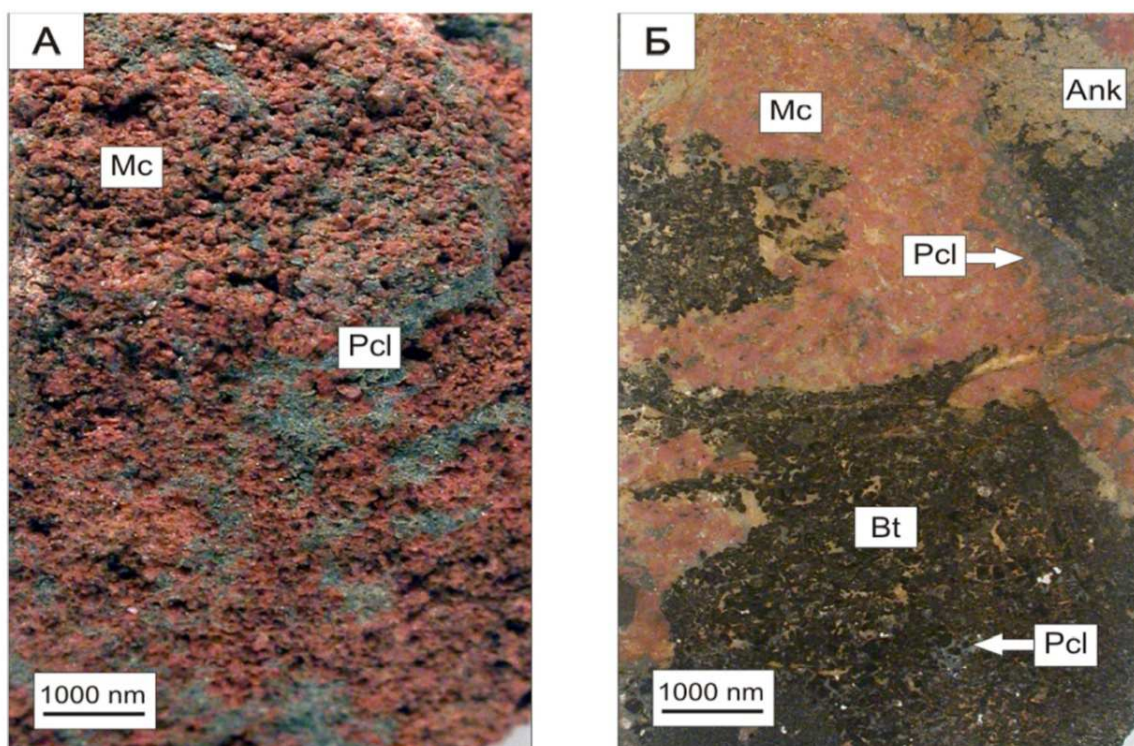


Рис. 3.5.1. Формы нахождения и морфология минералов ниобия в руде (прожилковые и гнездовидные выделения пирохлора в микроклинитовой (а) и карбонатит-слюдитовой (б) руде).
Буквами обозначены: Pcl – пирохлор, Mc – микроклин, Bt – биотит, Ank – анкерит.

Слюдитовые руды представлены метасоматитами апатит-биотитового состава, слабо карбонатизированными и микроклинитизированными. Наиболее богатые слудитовые руды содержат пирохлоровое оруденение в виде секущих мономинеральных прожилков мощностью до 1-5 мм, в более бедных разновидностях руд пирохлор образует вкрапленность отдельных кристаллов различной густоты в тесной ассоциации с апатитом.

Оконтурировать на геологических разрезах различные сорта слудитового типа руд на данной стадии изучения месторождения не представляется возможным вследствие того, что минералогическое картирование проведено только на двух профилях, а слудитовая залежь подсечена пятью профилями и распределение в ее пределах карбонатитовых жил и гнезд закономерно.

Основной полезный компонент руд – Nb, попутные – Р (в апатите) и микроклин (только в микроклинитовых рудах), а также уран, заключенный в пирохлоровом концентрате.

Характеристика природных типов и сортов руд приведена по данным изучения представительных технологических проб (табл. 3.5.1 и 3.5.2). По содержанию главного полезного компонента пробы БТ-24к и БТК-2 близки между собой (0,77% и 0,80% Nb₂O₅ соответственно), проба БТК-5 значительно обогащена Nb₂O₅ (1,19%). Отношение Nb₂O₅/Ta₂O₅ - 179, 133 и 202, соответственно.

Таблица 3.5.1

Химический состав технологических проб микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слудитовых руд Большетагнинского месторождения (в %)

Компонент	БТ-24к (микроклинитовый)	БТК-2 (карбонатит- слюдитовый)	БТК-5 (слюдитовый)
Nb ₂ O ₅	0,77	0,80	1,19
Ta ₂ O ₅	0,0043	0,0060	0,0059
P ₂ O ₅	3,4	5,5	5,5
Na ₂ O	0,2	0,3	0,1
MgO	0,3	4,8	5,8
Al ₂ O ₃	14,6	5,4	6,5
SiO ₂	51,5	23,5	27,4
K ₂ O	12,9	5,1	6,5
CaO	5,1	11,8	10,1
TiO ₂	0,5	1,4	1,9
Fe ₂ O ₃ общ	7,6	23,7	25,5
SO ₃	<0,1	0,5	0,2
S ₂ -	0,1	3,5	3,3
CO ₂	0,5	11,6	4,7
H ₂ O+	1,3	2,6	1,9
U	0,0027	0,0017	0,0028
Th	0,0009	0,0009	0,0019
ΣРЗО	0,025	0,027	0,036
всего	98,8	100,5	100,6
Nb ₂ O ₅ /Ta ₂ O ₅	179	133	202

Таблица 3.5.2

Минеральный состав технологических проб микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слудитовых руд Большетагнинского месторождения (в %)

Минерал	Технологическая проба		
	БТ-24к (микроклинитовый)	БТК-2 (карбонатит- слюдитовый)	БТК-5 (слюдитовый)
пироклор свободный	1,2	1,2	0,9
колумбит	0,1	0,1	0,6
апатит	7	13	12
микроклин	76	13	8
биотит	3	28	60
гидроксиды железа, гематит	10	2	1
пирит, пирротин	0,2	10	7
карбонаты	1	31	9

Проба карбонатит-слюдитовой руды в отличие от микроклинитовой характеризуется повышенным содержанием попутного полезного компонента – пентоксида фосфора. Также для неё характерно резко пониженное содержание таких рудообразующих компонентов, как кремнезём и глинозём и высокое содержание оксидов железа. По содержанию перечисленных компонентов руда пробы БТК2 близка к руде пробы БТК5. Главной отличительной особенностью химического состава карбонатит-слюдитовой руды как от микроклинитовой, так и от слюдитовой является её не силикатный, а карбонатно-силикатный состав: содержание в руде CO_2 составляет 11,6%, что значительно выше, чем в руде проб БТ-24к и БТК5 (0,5% и 4,7% соответственно).

Различие в химическом составе природных типов руд обусловлено разным минеральным составом: несмотря на то, что в состав всех руд входят одни и те же минералы, содержание их значительно варьирует. При том, что главным рудным минералом является пирохлор (0,9-1,2%), содержание колумбита в слюдитовой руде возрастает, по сравнению с двумя другими типами руд, в 6 раз (с 0,1 до 0,6%). Содержание апатита в два раза выше в слюдитовой и карбонатит-слюдитовой руде по сравнению с микроклинитовой. Содержания биотита и микроклина различаются практически на порядок (микроклинитовая руда содержит 76% микроклина и 3% биотита, слюдитовая – 8% и 60%, карбонатит-слюдитовая – 13% и 28% соответственно). Значительно различаются руды и по содержанию карбонатных минералов.

Главным минералом-концентратором ниобия в микроклинитовой и карбонатит-слюдитовой рудах является пирохлор, в слюдитовой – пирохлор и колумбит. Другие собственные минералы ниобия представлены луешитом.

Помимо собственных минеральных фаз незначительное количество ниобия рассеяно в виде изоморфной примеси в гематите и биотите, а также присутствует в виде микровключений пирохлора размером 1-3 мкм и мельче в микроклине, апатите, биотите, карбонатах, сульфидах, оксидах и гидроксидах железа.

Баланс распределения Nb_2O_5 по минералам микроклинитового, карбонатит-слюдитового и слюдитового типа руд представлен в табл. 3.5.3. Данные таблицы показывают, что с пирохлором, находящимся в срастании с колумбитом и образующим зёрна крупнее 1-3 мкм связано 91 отн.% ниобия микроклинитовой и карбонатит-слюдитовой руды и 94 отн.% слюдитовой руды. Эта цифра характеризует теоретически возможное извлечение полезного компонента при обогащении руды механическими способами.

Кроме отмеченных типов руд ниобиевое оруденение в незначительных количествах (~1,0% от общих запасов месторождения) выявлено в карбонатитах. Технологические испытания данного типа руд не проводились.

Баланс распределения Nb_2O_5 по минералам микроклинитовой (1), карбонатит-слюдитовой (2) и слюдитовой (3) руды (в %)

Основные минералы	Содержание минерала			Содержание Nb_2O_5 в минерале	Распределение Nb_2O_5		
	1	2	3		1	2	3
микроклин	79	13	8	0,06	5	1	1
биотит	3	28	60	0,10	0	3	3
апатит	8	13	12	0,06	1	1	1
пирротин + пирит	<1	10	7	0,04	0	1	1
гематит + гидроксиды Fe	8	2	1	0,34	3	1	1
пирохлор	1,2	1,2	0,9	63,31/60,12	84	84	55
колумбит	0,1	0,1	0,6	67,91/63,52	7	7	39
карбонаты	1	31	9	0,05	0	2	0
всего	100,3	98,3	98,5	0,91	100	100	100

3.5.3. Геолого-промышленный тип и генезис месторождения

Большетагнинское месторождение по классификации [Быховский, Потанин, 2009] относится к геолого-промышленному типу «ниобиевый в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК)». Примерами месторождений этого типа являются: разрабатываемое месторождение Сент-Оноре в Канаде и Белозиминское (Иркутская обл.). Отмеченные месторождения располагаются в карбонатитах. Большетагнинское месторождение, в отличие от них, приурочено к силикатным породам – микроклинитам и апатит-биотитовым метасоматитам.

Большетагнинское месторождение располагается в пределах одноименного массива УЩК и связано с процессами его становления. Почти все рудовмещающие породы имеют явно метасоматическое происхождение. При петрографических исследованиях выявляется, что слюдиты (апатит-биотитовые метасоматиты) образовались при замещении ийолитов; микроклиниты развиты, предположительно, по сиенитам.

Промышленное ниобиевое оруденение пространственно и генетически связано с метасоматическими породами и образует единую рудную залежь без перерыва переходящую из слюдитов в микроклиниты. Руды в слюдитах и микроклинитах характеризуются одинаковым минеральным составом, сходными геохимическими особенностями. Составы пирохлоров из слюдитов и микроклинитов схожи [Отчет о результатах..., 1993ф]. Все эти данные свидетельствуют о том, что образование рудной залежи с двумя типами руд произошло в течение одного этапа минералообразования.

С карбонатитами связан 2-й этап апатит-пирохлорового рудообразования – были сформированы рудные зоны, располагающиеся в породах карбонатитового штока за пределами месторождения. Карбонатиты характеризуются очень низкими содержаниями Nb и P, т.е. геохи-

мически не специализированы на эти элементы, вероятно, поэтому связанное с ними оруденение не получило промышленного масштаба.

3.5.4. Характеристика рудных тел

Рудная зона № 1 (см. рис. 3.4.1) – собственно Большетагнинское месторождение ниобия представлено Главной рудной залежью и девятью второстепенными рудными телами (далее - р.т.), из которых восемь участвовали в подсчете запасов. Главная рудная залежь сложена микроклинитовыми и слюдитовыми рудами, характеризуется линзообразной формой, ориентирована в северо-восточном направлении, протяженность ее 512 м, ширина выхода на поверхность до 220 м. На юго-западном фланге залежь разделяется на две ветви. Микроклинитовые руды составляют большую часть Главной рудной залежи. Слюдитовые руды составляют юго-восточную (в плане) часть Главной рудной залежи и образуют р.т. 3. Залегание Главной рудной залежи по отношению к контактам вмещающих ее пород субсогласное (рис. 3.5.2).

В рудных телах Главной рудной залежи встречаются прослои пустых пород и некондиционных руд. Положение их незакономерное. Наиболее мощные прослои отмечались на профиле 8 (12,5 м) и профиле 5 (34,0 м) (здесь и ниже приведены стволые мощности).

В пределах Главной рудной залежи сосредоточено 97,0% запасов Nb_2O_5 кат. C_1+C_2 . По типам руд запасы распределены следующим образом: микроклинитовые руды – 63,1%, слюдитовые руды – 36,9%. Параметры рудных тел и их изменения приведены в табл. 3.5.4.

Р.т. 1 сложено микроклинитовыми рудами, имеет линзообразную форму и ориентировано в субширотном направлении. В Главной рудной залежи составляет верхнюю (кровельную) часть. Длина рудного тела на поверхности составляет 420 м, средняя мощность 41,0 м. Падение – северное, углы падения колеблются от 20 до 60°. По падению р.т. прослежено скважинами на 330 м. Предполагается клинообразный характер выклинивания. Вещественный состав рудного тела не отличается от вмещающих микроклинитов, оконтуривание проведено по результатам опробования.

Р.т. 2 сложено микроклинитовыми рудами, имеет линзообразную форму и ориентировано в северо-восточном направлении. В Главной рудной залежи занимает центральное положение. По простиранию на поверхности рудное тело прослежено на 512 м, средняя мощность 54,3 м. Падение северо-западное, угол падения колеблется от 20-30° до 55-65°. По падению тело полезного ископаемого прослежено на 400 м. Граница с р.т. 3 – геологическая и проведена по контакту микроклинитов и слюдитов. Оконтуривание рудного тела проведено по данным опробования.

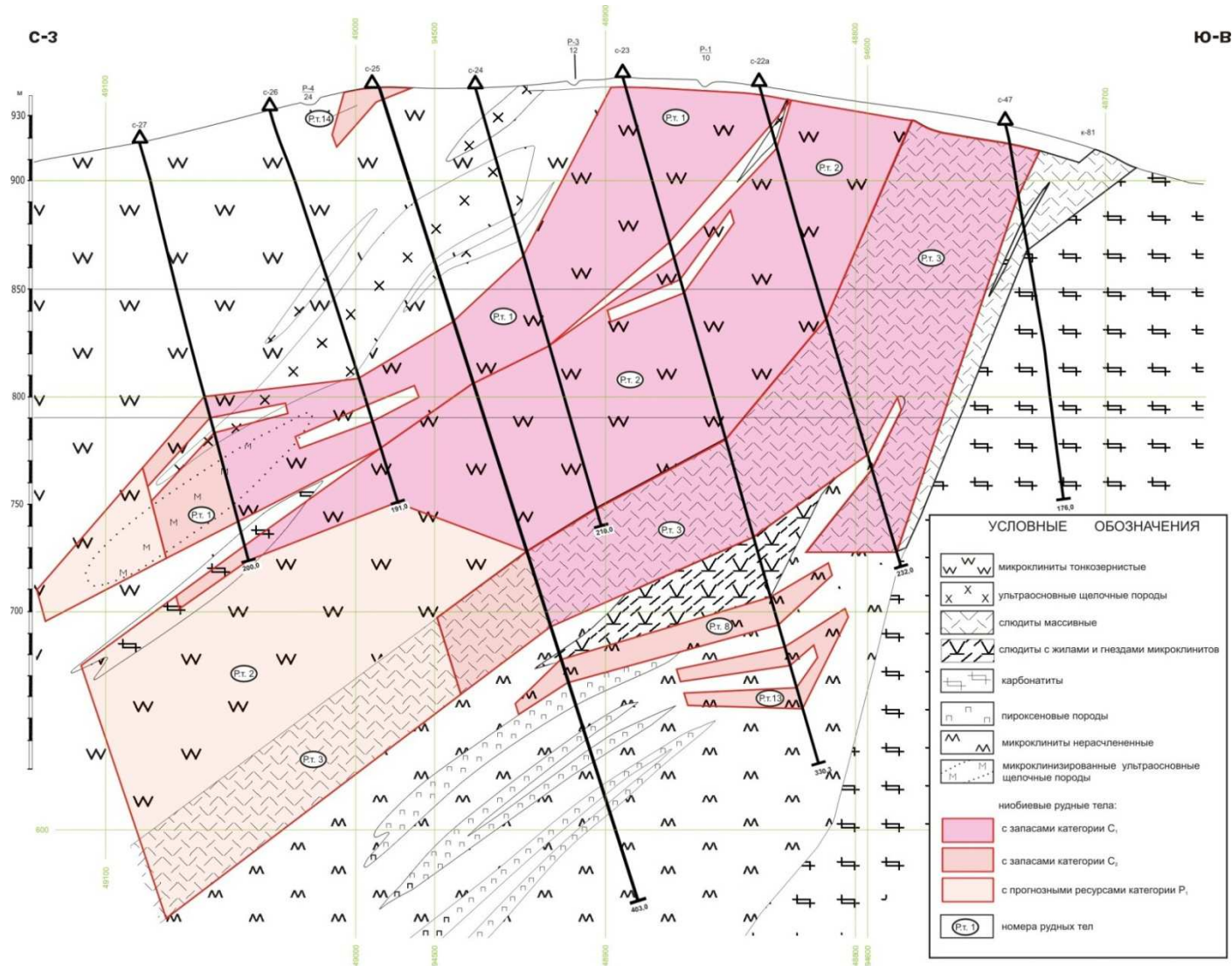


Рис. 3.5.2. Геологический разрез по профилю 6

Таблица 3.5.4

Параметры рудных тел Главной рудной залежи

Рудные тела	Тип руд	Длина на поверх., м	Средняя стволовая мощность, м	Содержание, % (в запасах кат. С ₁ +С ₂)		Коэф. рудо-ности	Запасы Nb ₂ O ₅ кат. С ₁ +С ₂ , тыс. т	Доля в запасах месторождения, Nb ₂ O ₅ , %
				Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅			
1	микроклин.	420	41,0	0,832	2,98	0,853	72,2	17,0
2	-«-	512	54,3	1,027	3,88	0,912	187,7	44,0
3	слюдит.	512	36,4	0,977	4,54	0,935	153,7	36,0

Р.т. 3 сложено слюдитовыми рудами, имеет линзообразную форму и ориентировано в северо-восточном направлении. В Главной рудной залежи составляет подошвенную часть. По простиранию рудное тело прослежено на 420 м и подсечено горными выработками. Средняя мощность 36,4 м. Падение северо-западное, углы падения колеблются от 15° до 70°. Причем на профилях 5 и 8 отмечается резкое изменение угла падения рудного тела: от 55-70° до субгоризонтального. По падению тело прослежено на 360 м. Оконтурирование рудного тела проведено по данным опробования. Характер выклинивания тела полезного ископаемого – клинообразный.

Второстепенные рудные тела

Второстепенные рудные тела образуют небольшие залежи, вмещающие 3% запасов Nb_2O_5 месторождения, и сложены микроклинитовыми и карбонатитовыми рудами. Оконтурирование всех рудных тел проведено по результатам опробования, запасы квалифицированы по категории С₂. Запасы P_2O_5 , ввиду слабой изученности на этот компонент, не подсчитывались; произведена оценка прогнозных ресурсов P_2O_5 .

3.5.5. Группа месторождения по сложности геологического строения

Большектагинское месторождение представлено Главной рудной залежью, а также девятью второстепенными рудными телами.

Главная рудная залежь (рудные тела 1, 2, 3) имеет линзообразную форму, протяженность ее по простиранию 512 м, ширина выхода до 220 м, по падению ниобиевое оруденение прослежено на 300-400 м. В рудных телах залежи сосредоточено 97% запасов ниобия. Рудные тела Главной залежи характеризуются слабо прерывистым оруденением (коэффициент рудоносности варьирует от 0,853 до 0,935), изменчивой морфологией рудных тел (коэффициент вариации мощностей изменяется от 42,8% до 57,9%) и неравномерным распределением основного полезного компонента (коэффициент вариации содержания Nb_2O_5 – 70,46-77,21%). Второстепенные рудные тела образуют небольшие залежи, вмещающие 3% запасов Nb_2O_5 . Протяженность их по простиранию меняется от 89 до 369 м, по падению они прослежены на 30-170 м.

Месторождение в соответствии с «Методическими рекомендациями по применению Классификации запасов месторождений...» [Методические рекомендации..., 2007] относится ко 2-й группе.

3.5.6. Запасы месторождения

Подсчет запасов произведен методом параллельных сечений способом вертикальных разрезов. ГКЗ Роснедра для подсчета запасов Большектагинского месторождения применительно к условиям отработки его открытым способом утвердила (протокол № 2954-оп от 19.12.2012 г.) следующие временные кондиции:

– к балансовым отнести запасы, посчитанные в экономически обоснованном контуре проектного карьера,

- бортовое содержание Nb_2O_5 – 0,3%,
- минимальная стволовая мощность рудного тела – 6 м (при меньшей мощности, но более высоком содержании, руководствоваться соответствующим метропроцентом),
- максимальная стволовая мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в подсчет запасов, – 6 м,
- к забалансовым отнести запасы за контуром проектного карьера, подсчитанные по параметрам кондиций для балансовых руд,
- в балансовых и забалансовых запасах в качестве попутных компонентов подсчитать запасы P_2O_5 , микроклина и урана.

По состоянию на 01.01.2016 г. балансовые запасы составляют: – руда кат. C_1 – 37124 тыс. т (362,55 тыс. т Nb_2O_5), кат. C_2 – 4950 тыс. т (4,5 тыс. т Nb_2O_5), забалансовые – 1043 тыс. т (9,5 тыс. т Nb_2O_5).

3.6. Основные результаты малообъемного технологического опробования руд месторождения

Малообъемное технологическое опробование (МТО) редкометалльных руд Большетагинского месторождения проводилось в два этапа [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф]. Его главными задачами являлись:

- 1) характеристика изменчивости вещественного состава и технологических свойств редкометалльных руд, в том числе в зоне окисления;
- 2) выявление параметров вещественного состава руд, определяющих их технологические свойства;
- 3) типизация и геометризация руд по вещественному составу (природные типы и разновидности) и технологическим свойствам (технологические типы и сорта);
- 4) формирование представительных типовых лабораторных проб.

Работы первого и основного этапа МТО включали изучение вещественного состава и технологических свойств природных типов и разновидностей редкометалльных руд, на втором, заключительном этапе определялись только основные параметры их вещественного состава, позволяющие по результатам работ первого этапа предварительно типизировать руды по составу и технологическим свойствам.

Основным объектом исследования являлся разведочный профиль 7, на котором скважинами было вскрыто оруденение большей мощности и менее тектонически нарушенное. В результате анализа результатов был сделан вывод о том, что содержание Nb_2O_5 в исходной руде практически не влияет на извлечение в черновой редкометалльный концентрат, но значительно влияет на его содержание в этом концентрате. На извлечение в концентрат значимое положительное

влияние оказывает степень раскрытия пироклора в верхнем классе обогащаемой руды $-0,125+0,07$ мм и содержание в руде микроклина.

С помощью регрессионного анализа сотрудниками минералогического отдела ФГУП «ВИМС» были построены модели, предсказывающие содержание и извлечение Nb_2O_5 в черновой концентрат в зависимости от вещественного состава исходной руды. А применение многофакторного кластерного анализа позволило при анализе по вещественному составу (первичным свойствам: содержание в руде Nb_2O_5 , P_2O_5 , SiO_2 , слюдистых минералов, карбонатов, сульфидов, оксидов и гидроксидов железа, степень раскрытия пироклора в классе $-0,125+0,07$ мм) выделить природные типы руд, а при анализе по технологическим показателям флотации – технологические типы и сорта руд.

При числе кластеров $n=2$, по показателям обогащения пробы были сгруппированы в два типа: микроклинитовый (соответствует микроклинитовому природному типу руд) и слюдитовый (соответствует переходному и слюдитовому природным типам руд), по вещественному составу классификация проведена идентично. При увеличении числа кластеров $n=3$, как по вещественному составу, так и по технологическим свойствам слюдитовый тип сохраняется, но происходит разделение микроклинитового типа на два подтипа, при увеличении числа кластеров до $n=4$ выделенные микроклинитовые подтипы как по составу, так и по обогатимости сохраняются, происходит разделение слюдитового типа на собственно слюдитовый и переходный, при этом разделение по обогатимости соответствует разделению по вещественному составу. Повышение числа кластеров до $n=5$ приводит к дальнейшему разделению микроклинитового типа на три подтипа, при этом разделение по составу и технологическим свойствам не совпадает (рис. 3.6.1).

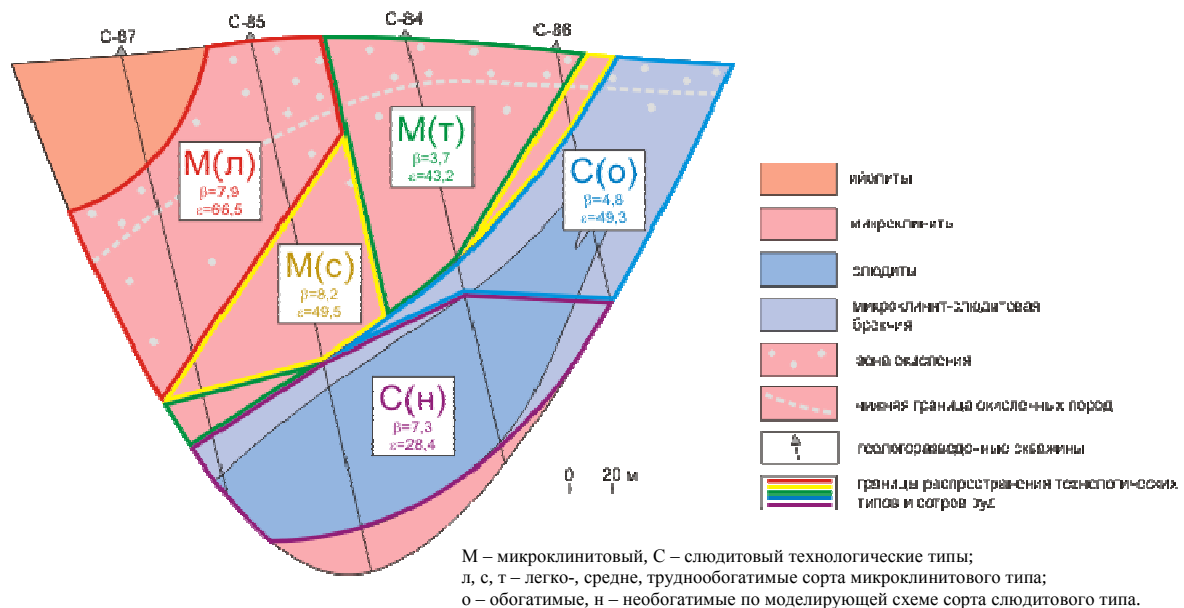


Рис. 3.6.1. Принципиальная схема выделения технологических типов и сортов руд Большетагнинского месторождения (схематический разрез профиля 7)

Кластерный анализ показал (табл. 3.6.1), что по параметрам вещественного состава могут быть выделены три природных типа руд: микроклинитовый, слюдитовый и переходный, которым соответствуют предварительно намеченные технологические типы руд.

Таблица 3.6.1

Технологическая типизация малообъемных проб по обогатимости

№№ МТП	Характеристика	Содержание, %				Выход к-та, %	Содержание Nb_2O_5 в к-те, %	Извлечение, %
		Nb_2O_5	P_2O_5	$S_{общ}$	Биотит			
1, 2, 4, 8, 9, 10, 12	«легкообогатимые» микроклинитовые	0,83	1,28	0,38	2,75	7,5	7,9	66,5
3, 11, 13, 14, 21, 26	«среднеобогатимые» микроклинитовые	0,96	2,54	1,90	4,00	5,6	8,2	49,5
5, 16, 17, 19, 20	труднообогатимые микроклинитовые	0,62	2,27	1,55	4,90	8,1	3,7	43,2
Итого микроклинитовые:		0,82	2,35	1,55	3,93	6,8	6,8	52,2
6, 22, 23, 25	переходные	0,80	4,27	3,90	29,30	9,8	4,8	49,3
7, 15, 18	слюдитовые	0,98	4,54	4,04	57,2	4,5	7,3	28,4

Микроклинитовый тип руд имеет невыдержанный и изменчивый состав по разрезу. Классификация по технологическим свойствам отличается большей устойчивостью, особенно при выделении сорта легкообогатимых руд. Учитывая, что намеченные три сорта геометризуются в самостоятельные крупные блоки, можно считать предварительно обоснованным выделение в пределах микроклинитового технологического типа сортов.

Вопрос о необходимости разделения слюдитового технологического типа руд на два самостоятельных типа (см. рис. 3.6.1), в соответствии с выделяемыми природными типами, нуждается в комплексном подходе, так как в рамках МТО и лабораторных испытаний сортовых и типовых проб показано, что руды переходного природного типа по своим технологическим свойствам близки к микроклинитовым (обогатимы по магнитно-флотационной схеме), тогда как руды слюдитового природного типа в рамках изученной схемы практически необогащаемы (обогащаются по магнитно-гравитационно-флотационной схеме).

Приведенные данные МТО по типизации редкометалльных руд по технологическим свойствам были подтверждены при последующих лабораторных испытаниях. Из легкообогатимой микроклинитовой руды получен флотоконцентрат, содержащий 40,8% Nb_2O_5 и 7,7% P_2O_5 . Сквозное извлечение Nb_2O_5 в такой концентрат в условиях замкнутой схемы прогнозируется на уровне 55-65%. При переработке в аналогичном режиме труднообогатимых микроклинитовых руд получен концентрат, содержащий около 16% Nb_2O_5 при извлечении 18-20%.

Изучение руды переходного типа показало, что как по схеме обогащения – технологическим свойствам, так и по качеству получаемого во флотационном цикле редкометалльного концентрата, она ближе к руде микроклинитового типа, тогда как при обогащении слюдитовой

руды применялась более сложная магнитно-гравитационно-флотационная схема с получением концентрата принципиально другого качества.

3.7. Основные решения по отработке запасов руды месторождения

Для месторождения принят открытый способ отработки, что обусловлено характером залегания рудных тел и возможностью практически полной отработки руды карьером, с применением предварительного рыхления как пород вскрыши, так и руды взрывным способом.

Отработка месторождения намечена 2-мя этапами: карьерами 1-ой и 2-ой очереди. Проектируемый карьер 1-ой очереди, отметка днища которого располагается на абсолютной высоте 820-830 м, будет целиком расположен в зоне аэрации и подземными водами обводняться не будет. Отметка дна карьера 2-ой очереди проектируется на абсолютной высоте 700 м. В этом случае в карьер будут фильтроваться подземные воды из обводненной толщи мощностью в 100 м. Фильтрационные свойства коренных пород весьма слабые.

Принята классическая транспортная система разработки с вывозкой со всех горизонтов карьера вскрышных пород и руды автосамосвалами. Проектируемый карьер относится к глубинно-нагорному типу, часть верхних горизонтов имеет выход непосредственно на рельеф. Горно-капитальные работы на карьере не требуются. Принята технология внешнего отвалообразования. По шкале крепости пород по М.М. Протодяконову породы и руды месторождения относятся к III категории (крепкие), коэффициент крепости (f) составляет 9-13 для руд, вмещающих пород – 5-12.

В карьере первой очереди преобладает микроклинитовый тип руд (~70%), оставшаяся доля в основном представлена переходным карбонатит-слюдитовым типом руд. В карьере 2-ой очереди на микроклинитовый тип руд приходится около 60%, оставшиеся 40% – на слудитовый тип. Естественная влажность руд – 0,3-1,5%.

Производительность карьера 1-ой очереди исходя из горнотехнических возможностей должна была составить 3,8 млн. т руды в год. Однако в соответствии с принятой величиной потребности рынка в основной товарной продукции (около 3,5 тыс. т/год Nb в феррониобии) и технологическими показателями переработки руд производительность карьера 1-ой очереди определена в объеме 1 млн. т руды в год. Коэффициент вскрыши – 0,93 м³/т. Руда на фабрику поставляется с первого года работы, так как горно-капитальные работы на карьере не требуются.

На 2-ом этапе мощность карьера по добыче руды составит 1 072 тыс. т в год, что связано со сменой карбонатит-слюдитового типа руд на слудитовый и изменением соотношения типов руд в карьере 2-ой очереди эксплуатации.

Выбор технологии переработки данных руд, относящихся к новому потенциально-промышленному типу и по вещественному составу не имеющих промышленных аналогов,

производился с учетом технологической и экономической эффективности ее отдельных блоков, что подробно изложено в Главе 4 данной работы.

В целом, технология заключается в следующем. Добытая горнорудная масса разделяется на рентгенорадиометрических контрольных станциях на типы. Далее два типа руд по отдельности обогащаются радиометрическим методом, получаемые концентраты РРО поступают на глубокое обогащение по комбинированным схемам, для чего на фабрике организованы две независимые секции глубокого обогащения. Флотационные концентраты двух типов руд объединяются, при этом пирохлоровый концентрат и микроклиновый продукт поступают на химико-технологическую переработку (доводку), а апатитовый отгружается непосредственно потребителю. В результате химико-технологической переработки пирохлорового концентрата получается пентаоксид ниобия металлургического качества NbO-M, направляемый далее на выплавку феррониобия стандартного сорта. После кислотной доводки микроклинового продукта получается микроклиновый концентрат с содержанием $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,29\%$.

4. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУД БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА

4.1. Краткий обзор современных технологий переработки ниобиевых и комплексных редкометалльных руд

4.1.1. Основные направления механического обогащения руд

Технология переработки редкометалльных руд определяется вещественным составом и, как правило, крайне чувствительна к минеральному составу как основных, так и попутных компонентов, вредных примесей. Для механического обогащения ниобийсодержащих руд определяющими являются: коэффициент раскрытия ценного компонента при оптимальной для обогащения крупности, характер минеральных ассоциаций, степень ошламования целевых минералов при рудоподготовке, изменчивость объёмных и поверхностных свойств в объёме месторождения (например, колумбитизация).

До конца 60-х годов прошлого века преобладающим способом обогащения был гравитационный, поскольку обогащению в основном подвергались руды кор выветривания (Нигерия) [Апельцин, Фельдман, 1958], из которых получали коллективный концентрат (с извлечением до 95%), комбинируя отсадку с обогащением в гидроциклонах. Поскольку большинство редкометалльных руд тонковкрапленные достичь приемлемого извлечения гравитационным методом не удавалось. Поэтому позже, параллельно с развитием техники флотации и реагентной базы, основной технологией обогащения становится флотация измельчённой и обесшламленной руды. В голове схемы нередко применение магнитной сепарации в слабом поле для удаления сильномагнитных минералов. Редкометалльный концентрат, содержащий до 60% Nb_2O_5 , направляется на металлургический передел [Иванков и др., 2002].

Большетагнинское месторождение – одно из крупнейших эндогенных месторождений, приуроченных к карбонатитовым комплексам. Наиболее близкими аналогами можно считать месторождения Ковдорское, Африканда, Сент-Оноре и Ока (Канада), хотя месторождения с идентичным большетагнинскому вещественным составом нигде в мире не разрабатываются в силу высокой технологической упорности. Основными методами обогащения являются гравитационные, магнитные и флотационные.

Разрабатываемое месторождение комплекса Сент-Оноре (Niobec Niobium Mine, Québec) выдаёт в настоящее время руду с содержанием 0,44-0,51% Nb_2O_5 . Обогащение протекает по схеме, схожей с принятой на Араше: измельчение до крупности -0,23 мм, обесшламливание по классу 9-10 мкм (потери ниобия - 15%), магнитная сепарация и три цикла флотации – карбонатная, пирохлоровая и двойная пиритная с промежуточным выщелачиванием фосфатов. Полу-

чаемый концентрат содержит 58% Nb_2O_5 . Флотационный концентрат подвергается алюминио-термическому восстановлению [Filho и др., 2009].

Многокомпонентность редкометалльных руд заставляет применять сложные комбинированные схемы переработки, постоянно вынуждая искать компромисс между извлечением компонентов и качеством продуктов, разрабатывать новые, более селективные флотореагенты и режимы флотации, совершенствовать металлургические способы вскрытия не только флотационных, но и достаточно бедных черновых гравииооконцентратов с целью повышения сквозного извлечения металла в товарную продукцию [Gupta, Suri, 1994].

Однако низкие концентрации тантала и ниобия в природном сырье, нестабильность состава и свойств, высокие требования к чистоте конечной продукции обуславливают сложность технологических схем при обогащении руд и необходимость применения для получения товарной продукции химико-металлургических методов [Кушпаренко, Петрова, 1994].

4.1.2. Основные направления химико-технологической переработки концентратов

Исследователями и промышленностью накоплен значительный опыт в области химико-технологической переработки редкометалльного танталониобиевого сырья. Разработан комплекс разнообразных методов, учитывающих особенности минерального и элементного составов сырья, соотношения в нем тантала и ниобия, тип минерализации [Бацуев и др., 1978; Гармазов и др., 2001; Зеликман и др., 1990; Крохин и др., 1979; Лихникевич и др., 1999].

Танталониобиевые концентраты от обогащения всех типов руд с редкометалльной минерализацией, характеризующиеся повышенными концентрациями Та и высоким соотношением Та и Nb, подлежат химическому переделу с получением как соединений тантала, так и ниобия.

Пироклоровые и другие концентраты с низким содержанием тантала ($\text{Nb}:\text{Ta} > 15-20$) являются сырьем на ниобий и используются в основном для выплавки феррониобия. Химический передел необходим только в тех случаях, когда механическими методами обогащения не удается получить кондиционные пироклоровые концентраты, если наряду с кондиционным концентратом получают некондиционные продукты или когда цель заключается не в производстве феррониобия, а в получении металлического ниобия или каких-либо его соединений.

Получаемые из тонковкрапленных редкометалльных руд механическим обогащением продукты во многих случаях не отвечают существующим стандартам на пироклоровые концентраты и подлежат химико-технологической переработке.

Для переработки танталониобиевых концентратов в промышленности наиболее широко применяется *фторидно-экстракционная* технология, включающая разложение концентратов фтористоводородной кислотой или смесью ее с серной, соляной или азотной кислотами с последующим экстракционным выделением и разделением из раствора тантала и ниобия. Но из-за

высокого расхода HF эта технология используется, главным образом, для богатых танталитовых и колумбит-танталитовых концентратов.

Несмотря на универсальность, фторидно-экстракционная технология не может быть рекомендована для переработки продуктов обогащения с высоким содержанием силикатных и алюмосиликатных минералов из-за высокого расхода дорогостоящей фтористоводородной кислоты. К существенным затруднениям приводят регенерация HF, утилизация жидких и твердых отходов и наличие в сырье редкоземельных и радиоактивных металлов, концентрирующихся в виде фтористых соединений в осадках от разложения.

Решение большинства задач при получении металлического ниобия и тантала из рудного сырья сложного состава обеспечивает *хлорная металлургия*. За рубежом данная технология занимает одно из ведущих мест при получении химически чистого металлического ниобия и его соединений непосредственно из пироклоровых концентратов и при переработке феррониобия.

Определенные сложности возникают с проведением хлорирования при переработке концентратов с повышенным содержанием кремнезема, циркона, радиоактивных металлов, фосфора [Крохин и др., 1979].

Значительный опыт накоплен исследователями по использованию *сернокислотного способа* применительно к некондиционным концентратам и промпродуктам обогащения колумбит-танталитовых и пироклоровых руд, что связано не только с относительно низким уровнем цен на серную кислоту, но и с особенностями разложения танталониобатов, что создает преимущества для селективного их вскрытия, особенно в составе алюмосиликатного сырья. В этом случае обеспечивается селекция тантала и ниобия, разлагаемых кислотой, от основной массы породообразующих минералов, не вступающих во взаимодействие с вскрывающим реагентом.

Большая часть разработок по использованию сернокислотной технологии относится к продуктам обогащения, танталониобиевая минерализация которых представлена пироклором, гатчеттолитом и микроклином, не требующих высоких температур для их разложения. Так, пироклор-перовскитовые продукты обогащения руд месторождения Ока (Канада) интенсивно взаимодействуют с 93%-ной серной кислотой при температуре 205°C. Процесс разложения завершается за 30-40 мин. Извлечение ниобия в раствор из сульфатной массы составляет 95,5%.

Японскими исследователями предложена *сульфатно-пероксидная* технология для комплексной переработки танталониобиевых концентратов, содержащих редкоземельные элементы и уран. Разложение концентрата проводят смесью серной кислоты с сульфатом натрия, выщелачивание спека – 10%-ной серной кислотой с добавкой H₂O₂ при нагревании. Из раствора осаждаются гидрооксиды ниобия и тантала. Редкоземельные элементы и уран остаются в растворе. Извлечение ниобия в продукт, содержащий 98% $\sum(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_5$, составляет 87%.

Важнейшей промышленной операцией, широко используемой в технологии применительно к трудноскрываемому редкометалльному сырью, является *спекание с гидроксидами и карбонатами щелочных и щелочноземельных металлов*. Спекание сопровождается практически полным разложением всей массы сырья, что позволяет при последующем выщелачивании спека удалить примеси, которые входят в состав сопутствующих рудных минералов и минералов породообразующего комплекса [Бацуев и др., 1978]. Получаемый пироклоровый концентрат годен для производства стандартного феррониобия [Зеликман и др., 1990].

Ведущими фирмами США, Бразилии, ФРГ и Канады для переработки тантал-ниобиевого сырья, особенно с низким содержанием металлов, используется *восстановительная плавка*, предусматривающая перевод ценных компонентов в полиметаллический сплав и последующую переработку сплава хлорированием, электролизом, растворением в кислотах, щелочах, окислением кислородом или кислородсодержащими солями [Гармазов и др., 2001].

В последние годы развивается направление, названное *сольвометаллургией*, с участием в процессах переработки минерального и техногенного сырья неводных растворителей [Гармазов и др., 2001]. Разновидностью сольвометаллургических методов является использование органических реагентов, в частности CCl_4 .

Таким образом, в настоящее время, накоплен значительный опыт в области химико-технологической переработки тонковкрапленных редкометалльных концентратов, продолжают научные исследования, направленные как на совершенствование традиционно используемых технологий, так и на поиск и разработку способов получения чистых соединений с применением более эффективных реагентов и технологических решений.

4.2. Проведенные исследования и предложенные варианты переработки руд

4.2.1. Радиометрическое обогащение

Применимость рентгенорадиометрического обогащения (РРО) руд Большетагинского месторождения с использованием метода рентгенорадиометрической сепарации (РРС) изучалась в ВИМСе на стадии поисково-оценочных работ с начала 90-х годов [Разработка..., 1992ф; Рябкин и др., 2000]. Кроме того на первом этапе оценивалась принципиальная возможность крупнопорционной сортировки на рентгенорадиометрических контрольных станциях (РКС) с использованием данных опробования керна скважин. Отмечена достаточная дифференцированность горнорудной массы в недрах, обеспечивающая приемлемую порционную контрастность в порциях руды массой 10 т.

В процессе изучения контрастности в недрах была установлена возможность разделения руд на РКС по типам (маложелезистые микроклиниты, высокожелезистые слюдиты) вследствие достаточной разницы в содержаниях железа.

На основании полученных данных рекомендована принципиальная схема предварительного рентгенорадиометрического обогащения, включающая дробление руды до крупности –300 мм, последующий рассев на машинные классы по границам 150, 75 и 30 мм и обогащение этих классов на сепараторах.

4.2.2. Рудоподготовка

Основной проблемой подготовки микроклинитовых руд Большетагнинского месторождения перед глубоким обогащением являются высокие потери пирохлора с образующимися шламами. Было доказано [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф], что величина потерь со шламами при флотации необесшламленной микроклинитовой руды не зависит непосредственно от её гранулярного состава после измельчения, также как и от величины содержания в ней полезного компонента. Поэтому основной задачей испытания и выбора рудоподготовительного процесса для микроклинитовой руды являлось достижение наиболее раннего раскрытия пирохлора и получение свежей, не покрытой окисными плёнками поверхности минеральных зёрен, что должно улучшить флотационные свойства руды. Таким условиям в наибольшей степени отвечает процесс сухой рудоподготовки, осуществляемый центробежно-ударным способом.

В ходе испытаний руда подвергалась дроблению с помощью аппарата, реализующего технологию активного ударного дробления EVC-500 (ООО «Evanko ltd.», г. С.-Петербург), с размером щели разгрузочной решётки 12 мм. Наибольшим выходом после дробления руды характеризуется фракция –12+0,2 мм (85,23%), при этом во флотационной крупности (–0,2 мм) уже сосредоточено 21,22% металла, что указало на необходимость предварительной классификации перед вторым этапом рудоподготовки – измельчением.

Испытания по дроблению показали высокую эффективность процесса при весьма низких энергозатратах ($\approx 0,2$ кВт·ч/т) и значительном выходе готового класса.

Испытания по измельчению дроблёной пробы центробежно-ударным способом проводились в лаборатории ЗАО «Урал-Омега» (г. Магнитогорск) на измельчительном комплексе КИ-0,36. При измельчении была выбрана крупность –0,2 мм, что обусловлено необходимостью не допустить переизмельчения пирохлора.

После проведения цикла испытаний по сухой рудоподготовке была получена подготовленная к глубокому обогащению руда крупностью 89% –0,16 мм.

Для выявления принципиальной разницы в обогатимости материала, подготовленного сухим центробежно-ударным и традиционным мокрым (шаровым) способом, дроблёная центробежно-ударным способом подверглась шаровому измельчению. При шаровом помоле был получен более низкий выход класса –10 мкм с более низким содержанием полезного компонента. Однако эти параметры не характеризуют технологические свойства руды, так как показатели

её флотационного обогащения не зависят от извлечения ниобия в класс крупности $-0,01$ мм. Поэтому эффективность использованных способов оценивалась по достигнутым в измельчённой руде параметрам раскрытия пироклора.

Данные сведения приведены в табл. 4.2.1. Приблизительный коэффициент раскрытия пироклора рассчитан с учётом содержания ниобия в характеризующихся продуктах.

Таблица 4.2.1

Сопоставление эффективности сухого центробежно-ударного и мокрого шарового измельчения микроклинитовой руды пробы БТ24к и керновой пробы БТ54

Способ измельчения/ продукт	Выход класса крупности от руды, %	Параметры раскрытия пироклора				Содержание, %	
		свободный, %	% отн.			Nb ₂ O ₅ сво- бодного пироклора	Nb ₂ O ₅ общ
			сростки богатые+ рядовые	сростки бедные+ включения	Кр*		
класс крупности +0,1 мм							
сухой/БТ54	31,21	0,05	21	71	8	0,03	0,39
мокрый/БТ54	15,91	0,14	23	60	17	0,09	0,53
сухой/БТ54, -0,125+0,1 мм	12,28	0,11	31	53	16	0,07	0,44
класс крупности +0,04 мм							
сухой/ БТ24к/160	4,21	0,72	не опр.		51	0,47	0,92
сухой/ БТ24к/100а	52,16	0,10			17	0,07	0,42
итого сухой/ БТ54	56,37	0,15			22	0,10	0,45
мокрый/БТ54	48,43	0,22			26	0,14	0,53

После сухого помола получен более грубый материал: выход класса $+0,04$ мм, в котором сосредоточен практически весь нераскрытый пироклор, составляет 56,37% по сравнению с 48,43% при шаровом помоле, при этом выход материала $+0,1$ мм составляет 31,21 и 15,91% соответственно, – но с сопоставимым коэффициентом раскрытия пироклора (22 и 26% соответственно в классе $+0,04$ мм, 16-17% в классе $-0,125+0,1$ мм). При этом содержание ниобия в грубом материале $+0,1$ мм выше после шарового помола (0,53% Nb₂O₅) по сравнению с сухим способом (0,44%). В то же время при сухом помоле наблюдается более значительное ошламование пироклора, на что указывает при близком значении выходов класса $-0,01$ мм повышенное содержание в нём Nb₂O₅ после сухого измельчения (1,62% и 1,23% соответственно). На более раннее раскрытие пироклора при сухом помоле по сравнению с мокрым также указывает более низкая доля пироклора в бедных сростках после сухого помола по сравнению с мокрым (31 и 23 отн.% соответственно).

Исследования по сухому измельчению руд карбонатит-слюдитового и слудитового типов не проводились, однако имеются существенные предпосылки по улучшению обогатимости и этих разновидностей руд при использовании центробежно-ударных дробилок и мельниц в циклах рудоподготовки.

Таким образом, при сухом помоле микроклинитовой руды происходит более интенсивное раскрытие пирохлора (в том числе за счёт крупных классов). При сухом помоле при сопоставимом коэффициенте раскрытия пирохлора также наблюдается более благоприятное распределение ниобия по типам сростков (выше доля пирохлора, содержащегося в богатых и рядовых сростках), что улучшает флотационные свойства материала и способствует более лёгкой доводке редкометалльных концентратов.

4.2.3. Глубокое обогащение

Как было отмечено, при проведении минералого-технологического опробования (МТО) в 2009-2010 гг. разведочного профиля №7 Большетагнинского месторождения было обосновано выделение на месторождении трёх технологических типов руд – микроклинитового, карбонатит-слюдитового и слудитового.

Микроклинитовый технологический тип руд делится по довольно большому набору параметров вещественного состава (коэффициент раскрытия пирохлора в классе $-0,125+0,07$ мм, содержание апатита, минералов железа и др.) на три технологических сорта. При этом выделение сортов руд непосредственно при документации и рядовом опробовании разрезов месторождения не представляется возможным.

Слюдитовый и карбонатит-слюдитовый типы руд отчётливо различаются в геологическом разрезе месторождения по содержанию жильных тел анкеритовых карбонатитов: в телах слудитов, относящихся к слудитовому типу, их содержание не превышает 10 об. %; в телах, относящихся к карбонатит-слюдитовому типу, – достигает 30 об. % и более. В результате слудитовый тип характеризуется содержанием биотита 50-60%, карбонатных минералов (анкерит с примесью сидерита и кальцита) до 10 %, карбонатит-слюдитовый – 20-40% биотита, 25-35% карбонатов.

Руда пробы БТ-24к характеризует микроклинитовые руды зоны гипергенеза Большетагнинского месторождения. Применение сухого помола позволило повысить крупность глубокого обогащения за счёт более эффективного раскрытия рудных сростков. В результате был получен более контрастный по флотационным свойствам материал.

По флотационно-магнитной схеме на руде пробы БТ-24к, подготовленной сухим способом, получены следующие показатели: содержание в редкометалльном концентрате 23,1% Nb_2O_5 при извлечении металла от руды 58,31%. По аналогичной схеме на руде, подготовленной мокрым способом, получены значительно более низкие показатели: 12,0% Nb_2O_5 при извлечении металла от руды 33,2%.

Редкометалльный концентрат микроклинитовых руд является нестандартным по минеральному составу и некондиционным по целому ряду компонентов (ниобий, титан, фосфор, сера). Но главной его особенностью является высокое содержание кремнезема, концентрирующе-

гося в микроклине – главном минерале концентрата наряду пироксеном. Содержание в концентрате около 20% SiO_2 представляет собой значительную сложность для его доводки гидрометаллургическими методами.

Руда карбонатит-слюдитового технологического типа существенно отличается от руды микроклинитового типа как по вещественному составу, так и по технологическим свойствам. Во-первых, низкое содержание ниобия в шламах карбонатит-слюдитовой руды позволяет проводить операцию по её глубокому обесшламливанию, в отличие от руды микроклинитового типа, что положительно влияет на флотационные свойства. Во-вторых, присутствие в руде около 60% слабомагнитных минералов (биотит, анкерит, пирротин) и практически немагнитного пироксена обуславливает эффективность применения в голове схемы магнитной сепарации. Она позволяет выделить в магнитную фракцию до половины объёма руды, поступающего на глубокое обогащение, тем самым вдвое сокращая фронт флотации.

Редкометалльный концентрат карбонатит-слюдитового сорта руд характеризуется значительно более высоким качеством по сравнению с концентратом микроклинитовых руд. Он содержит менее 10% SiO_2 , но обогащён фосфором (9% P_2O_5).

Главной особенностью вещественного состава слудитового типа руд является высокое содержание слюд (порядка 60%), а также значительная степень колумбитизации пироксена. Это обуславливает совершенной иной подход к предварительному обогащению данных руд для получения чернового концентрата.

Магнитное обогащение прошло сравнительно успешно только после гравитационного фракционирования песков на концентрационном столе. Гравиоконцентрат обогащался магнитной сепарацией в относительно слабом поле. Из хвостов гравитационного обогащения слюда выделяется в более сильном поле. Во флотационный цикл поступает черновой концентрат в количестве менее 30% от исходной руды с содержанием 3-4% Nb_2O_5 при извлечении 65-68%. Доводка чернового концентрата осуществляется по схеме, похожей на цикл переработки карбонатит-слюдитовых руд.

Таким образом, проведенные испытания по обогащению микроклинитовых руд, дроблёных и измельчённых центробежно-ударным способом, показали возможность получения из продуктов радиометрического обогащения пироксенового концентрата, содержащего порядка 30% Nb_2O_5 при извлечении не менее 68-70%.

Изучение технологических свойств карбонатит-слюдитовых руд показало возможность получения из руды (концентрата РРО, содержащего порядка 1% Nb_2O_5), 30%-ого по Nb_2O_5 концентрата при извлечении не менее 55%.

Исследования, проведённые на пробе слюдитовой руды, содержащей 1,2-1,3% Nb_2O_5 , показали возможность получения пирохлорового концентрата, содержащего порядка 30% Nb_2O_5 при извлечении не менее 40-45%.

В настоящей работе приняты описанные выше технологии обогащения трёх типов руд в контуре карьеров I и II очередей, причём по завершению отработки карбонатит-слюдитовых руд одновременно с началом добычи слюдитовых руд вводится в строй третья секция фабрики. Выполнен укрупнённый расчёт по реконструкции технологической ветки фабрики, перерабатывавшей карбонатит-слюдитовые руды.

Принципиальные схемы переработки руд карьеров I и II очереди приведены на рис. 4.2.1 и 4.2.2, соответственно. Получаемые пирохлоровый концентрат и микроклиновый продукт подвергаются дальнейшей переработке, апатитовый концентрат является конечной товарной продукцией.

4.2.4. Гидрометаллургическая переработка

Разработанные в ходе проведенных в 2009-2011 гг. ФГУП «ВИМС» исследований технологии переработки флотационных пирохлорового и апатитового концентратов обогащения руд Большетагнинского месторождения представлены на блок-схеме (рис. 4.2.3).

Технология термохимического обогащения концентратов с повышенным содержанием кремнезема, хотя и обеспечивает получение пирохлорового концентрата высокого качества, сопряжена с высоким расходом материальных и энергетических ресурсов и необходимостью введения дополнительной операции - щелочной отмывки нерастворимого остатка от геля кремниевой кислоты, а автоклавно-щелочно-кислотная технология – с повышенными температурой (250°C) и концентрацией едкого натра (250 г/л) [Разработка..., 1992ф].

С учетом особенностей флотационных концентратов обогащения руд Большетагнинского месторождения в качестве основного метода химико-технологической переработки предложен метод низкотемпературной сульфатизации. Проведение низкотемпературной сульфатизации обеспечивает избирательное вскрытие пирохлора в составе сырья с повышенным содержанием силикатных и алюмосиликатных минералов, а последующее гидролитическое разложение раствора сульфатов ниобия позволяет получить товарный пентаоксид ниобия марки НБО-М для последующей выплавки стандартного феррониобия [Лихникевич и др., 2014].

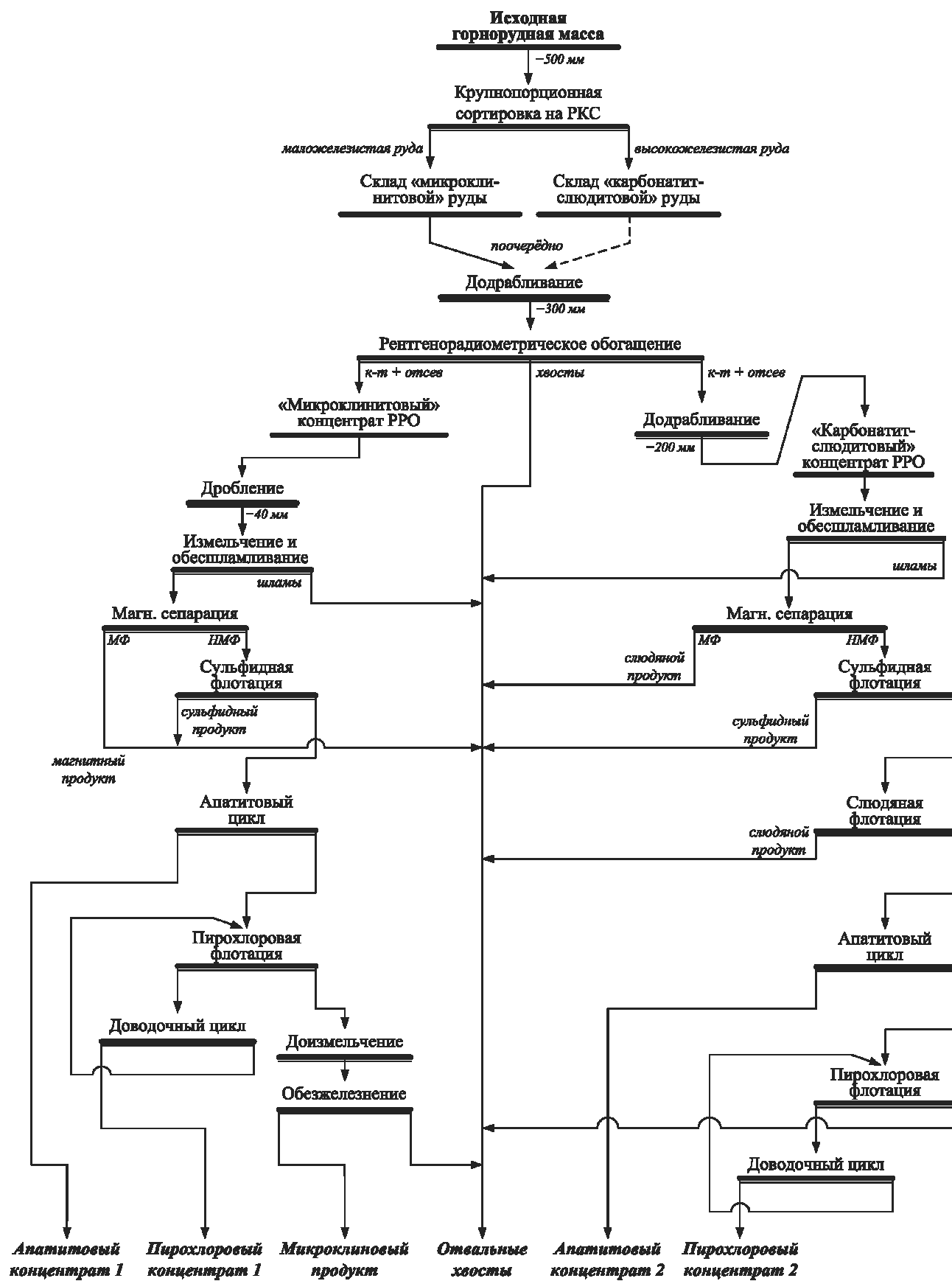


Рис. 4.2.1. Принципиальная схема переработки руд (карьер I очереди)

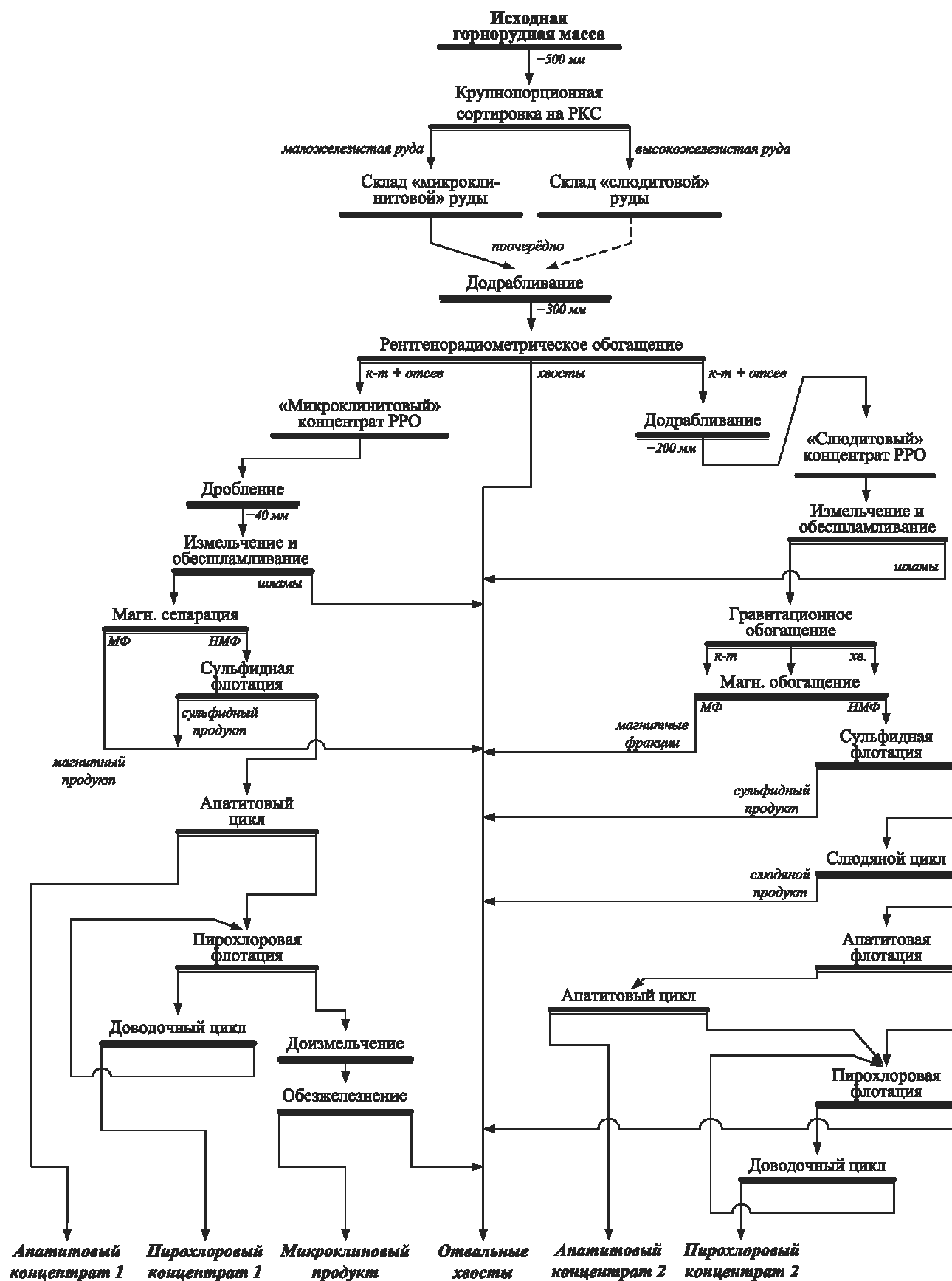


Рис. 4.2.2. Принципиальная схема переработки руд (карьер II очереди)

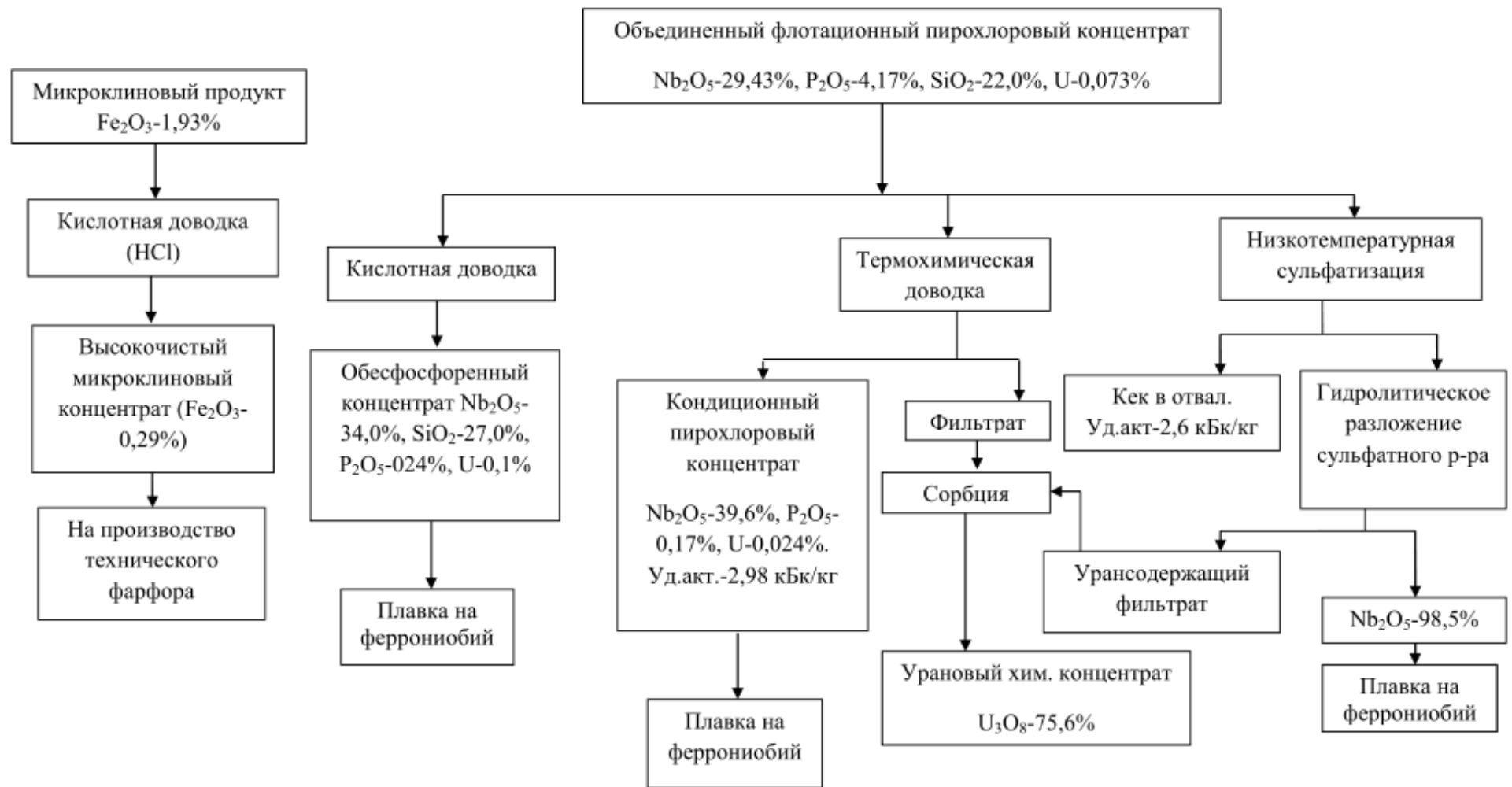


Рис. 4.2.3. Блок-схема химико-металлургической переработки объединенного пирохлорового концентрата и микроклинового продукта, полученных в результате глубокого обогащения ВИМС (2009-2011 гг.)

4.2.5. Пирометаллургическая переработка

Для переработки ниобиевых концентратов можно применять электропечную одностадийную (при небольшом содержании примесей) или двухстадийную плавку. Для переработки чистого пентаоксида ниобия применяется одностадийная внепечная плавка. Наиболее полное использование ниобия достигается при восстановлении его алюминием [Лякишев и др., 1981].

Одностадийная плавка пентаоксида ниобия (внепечная плавка). Использование чистого пентаоксида ниобия и концентратов с большим содержанием ниобия позволяет выплавлять из них кондиционный феррониобий внепечным методом [Стулов и др., 2012].

Измельченное ниобийсодержащее сырье смешивают с алюминиевым порошком той же крупности, железной рудой и натриевой селитрой. Полученную шихту загружают в плавильный агрегат и поджигают. В качестве плавильных агрегатов применяют конусные или цилиндрические ванны, которые футеруются магнезитовым кирпичом или магнезитокорундовым шлаком.

Внепечную алюминотермическую плавку без выпуска металла и шлака в стационарном горне в настоящее время в промышленных условиях на отечественных заводах не используют. Однако, из-за простоты аппаратного оформления внепечная плавка сохранила свое значение для промышленного производства легирующих сплавов, сопровождающегося высоким тепловым эффектом, в случае небольшого объема производства или получения тугоплавких продуктов реакции.

Одностадийная электропечная плавка ниобиевых концентратов. Для переработки ниобиевых концентратов, полученных после термохимической и кислотной доводки концентратов обогащения руд Большетагнинского месторождения, применима одностадийная алюминотермическая электропечная плавка. Плавку ведут следующим образом: шихту, состоящую из ниобиевого концентрата, алюминиевого порошка, железной руды (если необходимо) и извести, загружают в предварительно разогретую дуговую электропечь, где она проплавляется с получением феррониобия и отвального шлака [Стулов и др., 2012].

4.3. Оптимизация технологических решений

4.3.1. Краткая характеристика оптимизационного подхода

Эффективность и качество управленческого решения определяется, прежде всего, обоснованностью методологии решения проблем, т.е. подходов, принципов, методов. В настоящее время при управлении качеством и экономичностью продукции применяется множество научных подходов, одним из которых является широко известный оптимизационный подход [Авдохин, Петров, 2009; Канторович, 1960, 1972; Дубов и др., 1986, Орлов, 2004, Орлова, 2009, Новожилов, 1972].

Сущность оптимизационного подхода заключается в переходе от качественных оценок к количественным при помощи математических, статистических методов, инженерных расчетов, экспертных оценок, системы баллов и др. Данный подход весьма близок к широко известным системному, комплексному, программно-целевому подходам.

Оптимизационный подход реализуется путем установления зависимостей между технико-организационными и экономическими показателями, изучения механизмов действия закона масштаба и закона экономии времени, закона взаимосвязей затрат в сферах производства и потребления, зависимостей между показателями качества товара и затратами в сфере его производства и др.

Технология оптимизационных расчетов допускает реализацию процессно-ориентированного подхода в части отражения как локальных производственных процессов, так и балансовых моделей на разных уровнях. При сравнении различных вариантов решений оптимизационных задач ограничиваются учетом элементов, от которых зависит оптимальное решение. Здесь важна полнота рассмотрения множества возможных вариантов достижения поставленных целей, часто используется итеративный процесс пополнения вариантов по схеме «анализ – оптимизация – анализ»; учет ограниченности ресурсов.

Суть оптимизационного подхода к решению задач заключается в достижении максимально возможных конечных результатов при рациональных затратах различных ресурсов. Для решения каждой конкретной проблемы формулируется свой методологический подход, включающий определение видения проблемы, системы анализируемых показателей, критерия оптимизации.

Как было отмечено выше, одним из условий применимости оптимизационного подхода является обеспечение многовариантности решений. Но при этом альтернативные решения должны иметь сопоставимый вид. Сопоставимость вариантов расчета по исходной информации обеспечивается путем приведения их к одному объему, к одним срокам, уровню качества, условиям применения. На практике одновременно не всегда проявляются перечисленные факторы. Некоторые из них приводятся в сопоставимый вид путем применения для всех вариантов одной и той же математической модели расчета. Подробнее эти приемы будут учтены при изложении конкретного метода расчетов, принятого для изучения исследуемого вопроса.

4.3.2. Выбор оптимальных технологических решений

В рамках разработки эффективной технологии переработки руд Большетагнинского месторождения стояла задача оптимизации по экономическому критерию отдельных блоков технологической схемы (например, выбор способа рудоподготовки из двух альтернативных). В систему показателей, участвующих в анализе, вошли технологические показатели (выход продуктов, извлечение и содержание в них ниобия, расход различных ресурсов, перечень необходимого

оборудования), на основе которых были рассчитаны экономические показатели (стоимость товарной продукции, величина эксплуатационных и капитальных затрат). Критерием оптимизации являлся экономический эффект от применения того или иного решения. В отдельных случаях для его оценки использовался также показатель затратности процесса, величина которого для получения максимального эффекта должна быть минимальной. Сопоставимость рассматриваемых вариантов достигалась за счет:

- отдельного анализа конкретного блока технологической схемы;
- одинакового набора исходных данных;
- взаимозаменяемость оцениваемых процессов в общей технологической схеме;
- одинаковые объемы переработки и период оценки.

Принципиально схема переработки руд месторождения включает комбинацию обогательных методов (радиометрических, магнитных, флотационных) с получением одного или нескольких концентратов, и их последующие гидро- и пирометаллургические переделы с получением товарной продукции.

В связи с наличием множества альтернативных технологических решений, предложенных в результате технологических исследований, проведено экономическое обоснование выбора наиболее оптимальных из них.

Сравнение вариантов производилось на основе расчета показателей эффективности использования каждого из них – промежуточного, либо, при отсутствии такой возможности, интегральных. Под промежуточным показателем эффективности подразумевается показатель, который может быть использован для сравнительной оценки вариантов одного блока технологической схемы, например рудоподготовки. В качестве такого показателя (Z_i), на наш взгляд, можно использовать величину затрат на передел, приходящихся на 1 руб. продукции, получаемой после него [Савицкая, 2009], но дополнительно учитывающую также объем капитальных вложений. Для расчета была предложена следующая формула.

$$Z_i = \frac{(C_{\text{и}} + Z_{\text{э}})}{C_{\text{к}}} \cdot \frac{K_i}{K_{\text{баз}}}, \quad (1)$$

где: Z_i – затратность передела, усл. ед.;

$C_{\text{и}}$ – стоимость продукта, поступающего на передел, руб.;

$Z_{\text{э}}$ – эксплуатационные затраты на передел, руб.;

$C_{\text{к}}$ – стоимость получаемого после передела продукта, руб.;

K_i – капитальные затраты на передел, руб.;

$K_{\text{баз}}$ – капитальные затраты на передел по базовому варианту, руб.

Вариант, характеризующийся наименьшим значением показателя Z_i среди альтернативных, является наиболее эффективным. При наличии для вариантов одинаковых значений, используемых в формуле (1) показателей, она может быть упрощена путем их сокращения.

Интегральные показатели эффективности освоения месторождения при применении того или иного технологического решения рассчитывались в соответствии с существующими методиками [Методические рекомендации по оценке..., 1999, 2000] при производительности по добыче руд, предварительно принятой на уровне 1 млн. т.

На основе решений, разработанных в предшествующий оценке период [Разработка..., 1992ф, Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2007ф], в качестве базового варианта принята технологическая схема переработки руд Большетагнинского месторождения, включающая следующие операции:

- 1) добыча руды открытым способом;
- 2) крупнопорционная сортировка исходной горнорудной массы с разделением ее на технологические типы;
- 3) крупнокусковое рентгенорадиометрическое обогащение (РРО);
- 4) рудоподготовка (дробление и измельчение) горнорудной массы традиционным мокрым (шаровым) способом;
- 5) глубокое обогащение по флотационно-магнитной схеме;
- 6) термохимическая доводка пироклорового концентрата с последующей электропечной плавкой концентрата на феррониобий.

В целях оптимизации технологии переработки руд рассматриваются следующие решения:

- 1) обогащение руды без предварительного РРО;
- 2) применение инновационного метода рудоподготовки;
- 3) выбор технологии гидро- и пирометаллургического передела полученных концентратов.

Так как в карьер первоочередной отработки попадают в основном (~70%) руды микроклинитового типа (см. раздел 3.7), все технологические решения рассматриваются относительно именно его. Вариативность рассмотренных схем переработки руд данного типа Большетагнинского месторождения по основному ценному компоненту – ниобию – приведена на рис. 4.3.1.

4.3.2.1. Обоснование эффективности использования предварительного рентгенорадиометрического обогащения

Эффективность использования предварительного рентгенорадиометрического обогащения (РРО) руд месторождения осуществлено путем расчета интегральных показателей эффективности освоения объекта по двум вариантам: с использованием РРО и без использования данного метода (табл. 4.3.1).

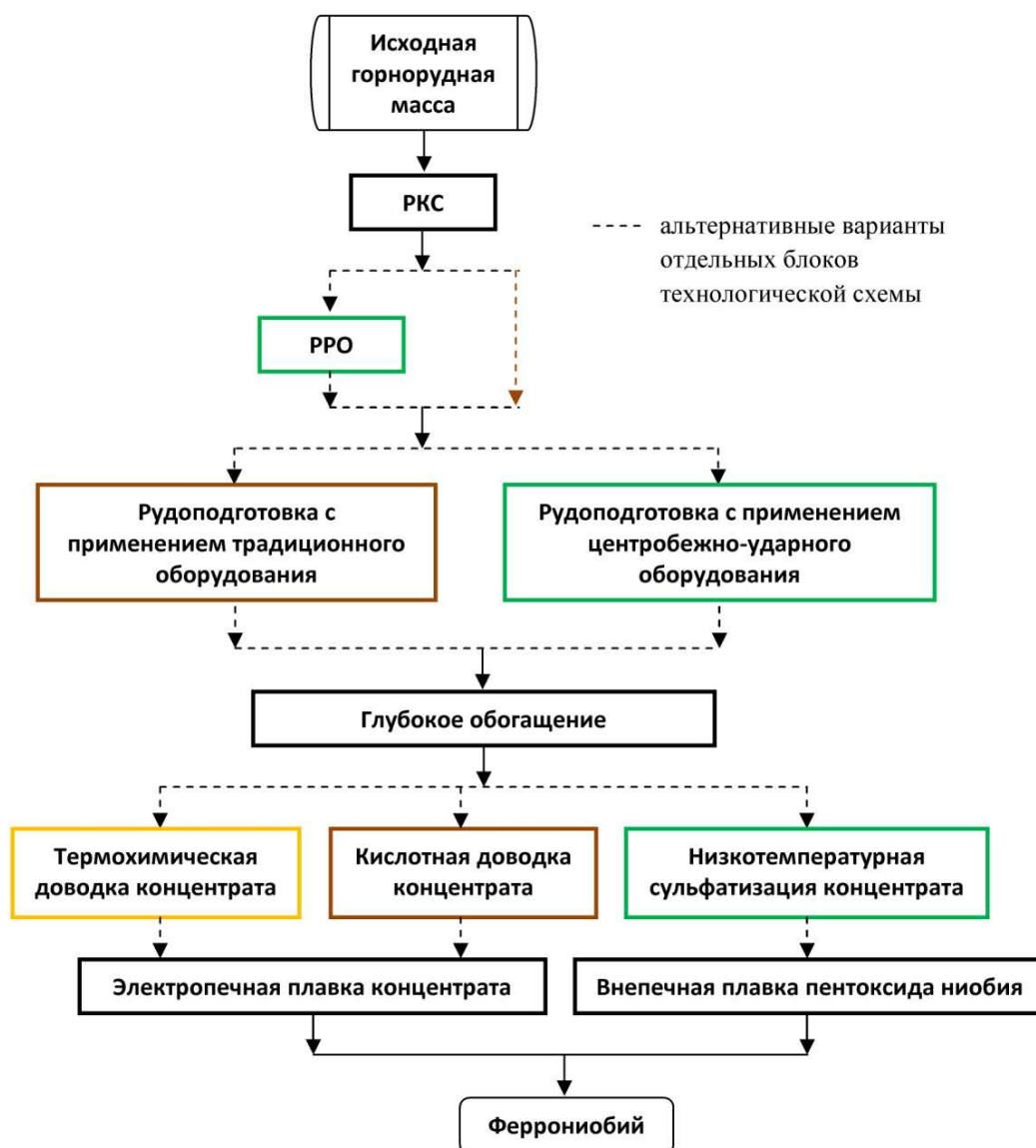


Рис. 4.3.1. Варианты технологии переработки руд Большетагнинского месторождения

Преимущества применения РРО:

- уменьшение объема горной массы, поступающей на дальнейшую переработку, за счет раннего выведения в недроблённом виде ее отвальной части;
- повышение содержания ценного компонента (Nb_2O_5) в перерабатываемой руде;
- улучшение качества рудного материала за счёт сброса в хвосты труднообогатимой тонковкрапленной части руд;
- повышение и стабилизация качества руды, поступающей на глубокое обогащение, с повышением при этом извлечения ниобия в концентрат;
- снижение экологических рисков освоения месторождения за счет уменьшения количества реагентов, необходимых на последующих переделах руды.

Анализ влияния использования предварительного РРО
на эффективность освоения Большетагнинского месторождения

Наименование показателей	Ед. изм.	Значение показателей	
		базовый вариант	вариант без РРО
Годовая производительность по добыче руды	тыс. т	1000	1000
Годовое количество продуктов после РРО:			—
- продукт РРО	тыс. т	606,9	
Годовое количество основной товарной продукции			
- ниобий в феррониобии	т	2398,6	2562,4
Годовая стоимость товарной продукции, всего	млн. руб.	2873,0	3072,6
Годовые издержки производства, всего	млн. руб.	1911,2	2260,0
Чистая прибыль	млн. руб.	686,2	555,2
Годовой доход	млн. руб.	950,7	879,7
Инвестиции в освоение, всего	млн. руб.	5080,0	5775,0
Рентабельность к общим инвестициям	%	13,5	9,6
Срок возврата инвестиций годовым доходом	лет	5,3	6,6

Недостатком применения РРО являются неизбежные потери части ниобия с крупнокусковыми хвостами, но они незначительны: в 393,1 тыс. т хвостов РРО (~39% от исходной руды) теряется около 600 т Nb_2O_5 (~8,5% от исходной руды).

Как видно из таблицы, отсутствие РРО в процессе обогащения исходной руды приводит к увеличению годовых издержек производства и инвестиций в объекты производственного назначения (см. табл. 4.3.1) за счёт переработки больших объемов. Одновременное увеличение количества производимой товарной продукции и, как следствие, ее стоимости не покрывает возросших издержек. В результате рентабельность относительно варианта переработки руд с использованием РРО снижается. Это подтверждает целесообразность его применения с экономической точки зрения.

4.3.2.2. Обоснование оптимального метода рудоподготовки

Основной проблемой в операциях рудоподготовки (дробление и измельчение) руд Большетагнинского месторождения перед глубоким обогащением являются высокие потери хрупкого пироклора с образующимися шламами. Поэтому основной задачей выбора рудоподготовительного оборудования являлось достижение наиболее раннего раскрытия пироклора с наименьшим его ошламованием и получение свежей, не покрытой окисными плёнками поверхности минеральных зёрен, что значительно улучшает флотационные свойства руды.

В качестве инновационного способа рудоподготовки применено дробление в дробилке активного удара EVANKO (г. Санкт-Петербург) и последующее сухое измельчение в центробежно-ударных мельницах производства компании Урал-Омега (г. Магнитогорск). Этот

процесс позволил получить флотоактивный материал с более высокими параметрами раскрытия целевого компонента при меньших удельных энергозатратах.

Таким образом, выбор лучшего с экономической точки зрения способа рудоподготовки (до крупности 100% –0,125 мм) осуществлялся из двух вариантов проведения данной операции в зависимости от способа помола (сухой или мокрый) и применяемого технологического оборудования:

- 1) традиционный способ рудоподготовки (мокрый, шаровой),
- 2) сухой способ рудоподготовки на инновационном оборудовании (дробилках активного удара и центробежно-ударных мельницах).

Технологически применение сухого способа рудоподготовки обосновано более интенсивным раскрытием пирохлора (в том числе за счёт крупных классов), чем при традиционном мокром (шаровом) способе. При этом наблюдается более благоприятное распределение ниобия по типам сростков (выше доля пирохлора, содержащегося в богатых и рядовых сростках), что улучшает флотационные свойства материала, способствует повышению извлечения ниобия и более лёгкой доводке редкометалльных концентратов.

Годовые эксплуатационные затраты и стоимость оборудования определены прямым счётом, стоимость измельченного материала принята экспертно с учетом его качества. Стоимость поступающего на рудоподготовку продукта по вариантам равна, поэтому расчет затратности процесса осуществляется по упрощенной формуле (1):

$$Z_i = \frac{Z_{\text{э}}}{C_{\text{к}}} \cdot \frac{K_i}{K_{\text{баз}}} \quad (2)$$

Результаты расчета показателя относительной затратности по вариантам приведены в табл. 4.3.2.

Таблица 4.3.2

Сводная таблица сопоставления вариантов рудоподготовки

Показатель	Варианты рудоподготовки	
	базовый	ударный
Величина годовых эксплуатационных затрат, млн. руб.	90,4	74,6
Стоимость оборудования отделения, млн. руб.	184,5	169,2
Стоимость измельченного материала, млн. руб.	100,0	110,0
Затратность, усл. ед.	0,90	0,62

Как видно из таблицы, рудоподготовка с применением традиционного способа дробления (вариант 1, базовый) характеризуется более высокими затратами, как капитальными, так и эксплуатационными, и следовательно, показателем затратности (0,90), по сравнению с применением прогрессивного вида дробильно-измельчительного оборудования (вариант 2, ударный), для которого показатель затратности в 1,5 раза меньше (0,62). Это обуславливает бóльшую

экономическую эффективность применения сухого способа рудоподготовки на инновационном оборудовании (дробилках активного удара и центробежно-ударных мельницах).

4.3.2.3. Обоснование оптимального варианта металлургического передела

Как было сказано выше, для получения конечной товарной продукции (в нашем случае, феррониобия) необходимо осуществить гидро- и пирометаллургический передел получаемого после обогащения ниобиевого концентрата. Оптимизация решений осуществлялась для металлургического передела в целом.

Получаемый на стадии глубокого обогащения руд Большетагининского месторождения черновой ниобиевый концентрат является некондиционным и подлежит доводке. В результате выполненных специалистами ФГУП «ВИМС» исследований по химико-технологической переработке флотационного концентрата с получением конкурентоспособной товарной продукции были разработаны три схемы [Лихникевич и др., 2013] (рис. 4.3.2).

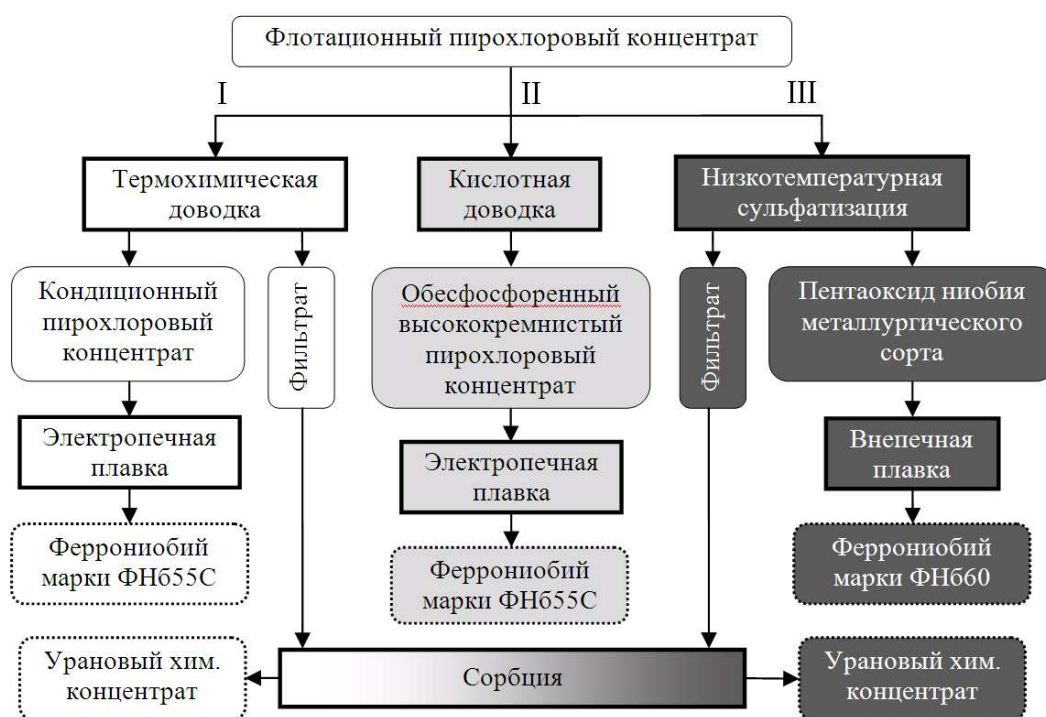


Рис. 4.3.2. Блок-схема вариантов металлургической технологии переработки флотационного пирохлорового концентрата

1. Термохимическая доводка с получением кондиционного пирохлорового концентрата (39,6% Nb_2O_5) и попутным урановым химическим концентратом.
2. Кислотная доводка с получением обесфосфоренного высококремнистого пирохлорового концентрата (34% Nb_2O_5).
3. Сульфатизация с получением пентаоксида ниобия металлургического сорта (98,5% Nb_2O_5) и попутным урановым хим. концентратом.

Металлургическая переработка пирохлоровых концентратов осуществлялась электропечной одностадийной плавкой, пентаоксида ниобия – одностадийной внепечной алюминотермической плавкой.

В связи с тем, что стоимость входящего продукта по вариантам равна, относительный показатель экономической эффективности применения каждой схемы переработки определялся без ее учета путем сопоставления величины затрат на химико-металлургический передел в целом и суммарной стоимости получаемой после данного передела товарной продукции (при применении разработанной сорбционной технологии попутного получения уранового химконцентрата в первом и третьем вариантах учитывается стоимость обоих продуктов) по формуле (2).

Экономическая оценка вариантов показала, что первые два характеризуются большими эксплуатационными издержками при меньшей стоимости получаемой товарной продукции относительного третьего варианта (рис. 4.3.3). С технологической точки зрения это объясняется тем, что термохимическая технология доводки основана на полном разложении всей массы концентрата, а следовательно, сопряжена с большими затратами энергетических и материальных ресурсов. А при кислотной доводке не обеспечивается кондиционирование концентрата по кремнезему, что отрицательно сказывается на качестве и стоимости выплавленного из него феррониобия.

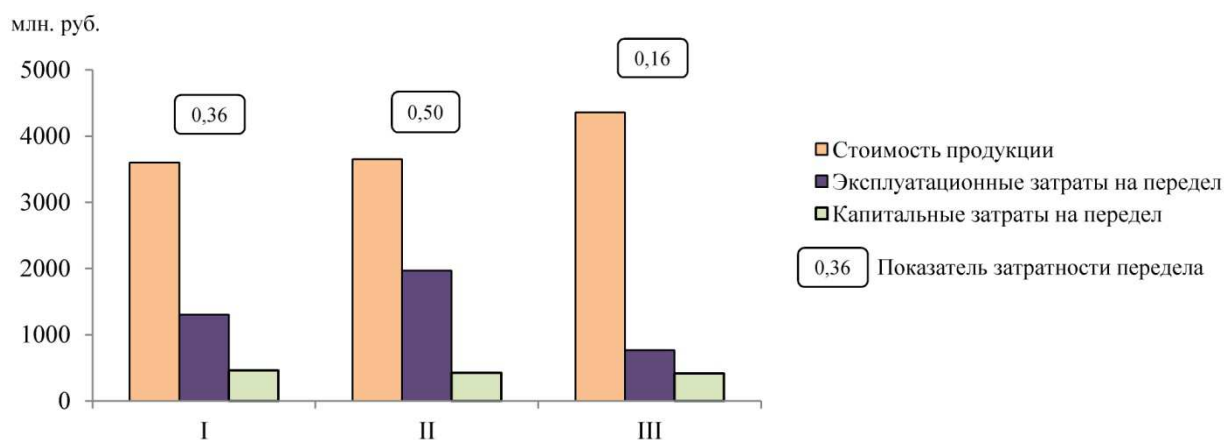


Рис. 4.3.3. Результаты экономической оценки альтернативных технологий химико-металлургической переработки флотационного концентрата

При переработке пирохлорового концентрата методом сульфатизации не требуется полное разложение всей его массы, что приводит к снижению величины используемых материальных и энергетических ресурсов, а значит, и эксплуатационных затрат. В результате получен пентаоксид ниобия, из которого может быть выплавлен феррониобий стандартного сорта высокого качества.

Результаты расчета показателя затратности передела показали, что сульфатизация с последующей одностадийной внепечной алюминотермической плавкой характеризуется

наименьшим показателем затратности (0,16) и с экономической точки зрения является оптимальной технологией металлургической переработки флотационного ниобиевого концентрата, получаемого из руд Большетагнинского месторождения.

Таким образом, проведенная оценка альтернативных вариантов отдельных блоков технологической схемы позволила выделить среди них наиболее оптимальные как с технологической, так и с экономической точки зрения. В результате проведенного анализа установлено, что на современном этапе развития техники и технологии, а также при сложившихся рыночных условиях для эффективного освоения Большетагнинского месторождения оптимальная технология переработки руд должна включать:

- крупнопорционную сортировку исходной горнорудной массы с разделением ее на технологические типы,
- крупнокусковое обогащение каждого типа руд рентгенорадиометрическим методом,
- инновационный способ рудоподготовки (дробление в дробилке активного удара EVANKO и сухое измельчение в центробежно-ударных мельницах),
- глубокое обогащение по флотационно-магнитной схеме, сульфатизация с получением пентаоксида ниобия и его выпечная алюминотермическая плавка на феррониобий высокого качества.

Все перечисленные решения в итоге вошли в рекомендуемую технологию переработки руд Большетагнинского месторождения в рамках разработанного ФГУП «ВИМС» технико-экономического обоснования разведочных кондиций и подсчета запасов [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф].

Таким образом **обоснована экономически оптимальная комбинированная схема переработки руд Большетагнинского месторождения, включающая предварительную крупнокусковую радиометрическую сепарацию, специальную рудоподготовку, гравитационно-магнитно-флотационное обогащение, нестандартную схему химико-металлургического передела продуктов обогащения с получением в качестве товарных продуктов феррониобия, микроклинового, апатитового и уранового концентратов.**

5. ОБОСНОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗНАЧИМОСТИ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ

Общей тенденцией современного этапа освоения минеральных ресурсов является снижение качества добываемых полезных ископаемых, химический и минералогический составы которых меняются в пределах площади отдельных месторождений, и перемещение добывающих производств в менее освоенные районы. Это отрицательно сказывается на себестоимости получаемой продукции и определяет необходимость проведения тщательного анализа рынков сбыта конечных продуктов и применения при их производстве современных экономически обоснованных технологий переработки руд, позволяющих получать востребованную товарную продукцию [Козловский, 2002, Потанин и др., 2006; Курков, Котова, 2007; Быховский, Воропаев, 2004, Мировой минерально-сырьевой комплекс..., 2009, Эпштейн и др., 2000].

Большетагнинское месторождение ниобия может представлять промышленную ценность при использовании разработанных сотрудниками ФГУП «ВИМС» инновационных и усовершенствованных традиционных технологических схем переработки руд, выбор которых обоснован минералого-аналитическими, технологическими исследованиями и экономическими расчетами [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф, Пожарицкая и др., 2006, Быховский и др., 2002, Разработка принципиальной технологии..., 1992ф]. Проведенные при этом маркетинговые исследования рынков покажут степень востребованности товарных продуктов и позволят дополнительно подтвердить эффективность освоения объекта в современных рыночных условиях.

5.1. Краткие маркетинговые исследования рынков товарной продукции

5.1.1. Обзор рынка ниобиевой продукции

Ниобий – тяжелый тугоплавкий металл, обладающий высокой коррозионной стойкостью и способностью образовывать жаропрочные и сверхпроводящие сплавы. В качестве легирующей добавки ниобий обеспечивает повышение прочностных свойств сталей с одновременным сдвигом в сторону более низких температур области их хрупкого разрушения, что особенно важно в производстве труб большого диаметра для газо- и нефтепроводов, ответственных металлоконструкций и др.

В мире ниобий широко применяется практически во всех высокотехнологичных областях промышленности, в связи с чем, уровень его потребления является одним из важнейших индикаторов развития и конкурентоспособности национальных экономик.

Рынок ниобия подразделяется на два основных сегмента: 1) около 90% всего ниобия в мире приходится на феррониобий, используемый для легирования стали, особенно высокопрочной низколегированной стали HSLA; 2) остальные 10% ниобия (так называемый «чистый ниобий») используются либо в форме его химических соединений (главным образом в виде

пентаоксидов высокой чистоты – в производстве оптического стекла; линз для видеокамер; твердых сплавов; конденсаторов для электроники; катализаторов и др.), либо в металлической форме (для производства электролитических конденсаторов, сверхпроводниковой техники, суперсплавов и др.). Для производства металлического ниобия используется пентаоксид ниобия металлургического качества (мин. 99% Nb_2O_5).

Минерально-сырьевая база

Общие мировые запасы ниобия в недрах, оцененные по сумме запасов месторождений на начало 2016 г., составляли около 8 млн. т Nb_2O_5 (без России). Подавляющая их часть сосредоточена в Бразилии, также обладают значительными запасами ниобия такие страны как Боливия, Китай, ЮАР и др.

Ниобийсодержащими минералами, имеющими промышленное значение, являются пирохлор (37,5-65,6% Nb_2O_5), колумбит-танталит (до 80% Nb_2O_5), лопарит (8-10% Nb_2O_5).

Основным промышленным типом месторождений ниобия являются карбонатитовые комплексы и коры выветривания по ним, на которые приходится более 90% запасов и 99% добычи ниобия. Оставшаяся часть запасов (8%) сосредоточена в редкоземельных кварц-микроклин-альбитовых метасоматитах, пегматитах и их россыпях.

Следует отметить, что действующая и потенциальная сырьевая база ниобия за рубежом, как правило, представлена месторождениями с большими запасами и высоким содержанием этого металла, а основным промышленным минералом является пирохлор.

Россия по величине запасов ниобия занимает 2-е место в мире после Бразилии. Большая их часть выявлена на юге Восточной Сибири, а также в Мурманской области. Превалирующая часть запасов ниобия России (более 50% кат. А+В+С₁) сосредоточена в рудах комплексных ниобий-танталовых месторождений. Главным компонентом месторождений данного типа является тантал, стоимость которого выше стоимости ниобия. Поэтому концентраты, получаемые при обогащении руд этих месторождений, перерабатываются, прежде всего, с целью получения танталовой продукции; попутно получаемой ниобиевой продукцией является пентаоксид ниобия, причем масштабы производства ограничены объемами производства пентаоксида тантала.

В собственно ниобиевых месторождениях – карбонатитовых комплексах и корях выветривания по ним сосредоточено около 40% балансовых запасов кат. А+В+С₁. Большая их часть может быть использована для производства феррониобия.

В распределенном фонде недр находятся только 4 месторождения: разрабатываемое – Ловозерское (ниобий-танталовое) месторождение, подготавливаемые к освоению – Катугинское и Зашихинское (танталовое), участок Буранный Томторского месторождения (ниобиевое).

Ловозерское месторождение расположено в Мурманской области, отрабатывается подземным способом ЗАО «Ловозерская горно-обогатительная компания». К достоинствам место-

рождения относится стабильность минерального и химического составов руд, а также получаемого из них лопаритового концентрата, на ~80% состоящего из полезных компонентов [Быховский, Пикалова, 2015]. Лопаритовый концентрат поступает на переработку на СМЗ, где из него в том числе получают около 600 т в год пентоксида ниобия различного качества [Годовой отчет..., 2016].

Катугинское месторождение расположено в Каларском районе на севере Читинской области недалеко от ж/д ст. Чара. Район приравнен к Крайнему Северу, сейсмичен, не освоен. Руды месторождения труднообогатимые. По сложности гидрогеологических и горнотехнических условий месторождение относится к простым. Месторождение может отрабатываться карьером с производительностью 1 или 3 млн. т руды в год (согласно ТЭО ГИРЕДМЕТа), с приемлемой рентабельностью и относительной ценностью получаемых металлов (% от 100): 31 Та, 28 Nb, 30 REE+Y, 11 остальных [Стратегия использования..., 1998, Архангельская и др., 2006].

Зашихинское месторождение расположено в Нижнеудинском районе Иркутской области, в 45 км к юго-востоку от пос. Алыгджер, в горно-таежной местности. Район экономически плохо освоен. Расстояние до ближайших ж/д станций – 150 км до Нижнеудинска и 160 км – до Тулуна. В 2009 г. утверждены временные разведочные кондиции для подсчета запасов месторождения для условий отработки открытым способом. В 2010 г. недропользователем ЗАО «ТЕХНО-ИНВЕСТ АЛЪЯНС» разработано Техническое (геологическое) задание на проведение геолого-разведочных и опытно-эксплуатационных работ месторождения. В 2014 г. проведены опытно-эксплуатационные работы. Предполагается, что эксплуатация месторождения начнется в 2018 г. с первоначальной годовой производительностью по добыче руды 1 млн. т, при этом годовой выпуск пентаоксида ниобия составит 2 тыс. т [www.kommersant.ru].

Томторское месторождение расположено на севере Республики Саха (Якутия). Ближайшие населенные пункты: пос. Саскылах в 150 км; пос. Эбелях, где расположен аэропорт, в 110 км. По результатам аукциона право пользования недрами на месторождении (участок Буранный) с целью разведки и добычи руд ниобия, РЗМ, скандия и попутных компонентов предоставлено ООО «Восток Инжиниринг» (ЯКУ 15763 ТЭ, 06.08.2014 г. – 31.08.2034 г.). В апреле 2016 г. на Буранном участке месторождения закончены ГРР. Оработку месторождения предполагается производить открытым способом в зимнее время года. Вовлечение Томторского месторождения в эксплуатацию, планируемое не ранее 2020 г., во многом будет зависеть от результатов его опытной отработки и спроса на редкометалльную продукцию, в первую очередь редкоземельную и скандиевую [ТриАрк Майнинг, Быховский, Потанин, 2009].

Таким образом, Россия обладает крупной потенциальной сырьевой базой ниобия, которая может обеспечивать не только ближайшие потребности страны и, возможно, мирового рынка, но и удовлетворить значительные прогнозируемые потребности в новых отраслях промышленности.

Производство

Доминирующим поставщиком ниобия на **мировой рынок** является Бразилия, на которую в 2016 г. приходится ~90% всей мировой добычи этого металла. В Бразилии эксплуатируется крупнейшее в мире месторождение пирохлора – Агаха (более 80% мировой добычи). Разработка месторождения осуществляется компанией Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Месторождение отрабатывается открытым способом. Содержащийся в месторождении пирохлор извлекается в 65%-ный концентрат (по содержанию оксида), из которого электродуговой плавкой получают феррониобий. В настоящее время мощности компании по производству феррониобия составляют около 100 тыс. т [TIC].

На предприятии выпускается также пентаоксид ниобия, который является сырьем для производства феррониобия вакуумного сорта, и никель-ниобиевые сплавы. Чистый пентаоксид служит сырьем для получения слитков металлического ниобия.

Вторым в мире продуцентом ниобия является также бразильская компания Mineração Catalao de Goiás (MCG), эксплуатирующая рудник Catalao. Из руд, содержащих около 1,2% Nb₂O₅, с использованием физических и флотационных методов получают 54-60%-ный концентрат, который затем перерабатывают на феррониобий. Мощности компании по выпуску FeNb – 6700 т [TIC]. Увеличение мощностей не планируется.

Добыча пирохлоровых руд и производство феррониобия осуществляются на руднике Niobes в пров. Квебек (Канада). Добыча ведется подземным способом. На этом предприятии руда, содержащая около 0,6% Nb₂O₅, перерабатывается в 60-65%-ный концентрат, из которого на этом же предприятии получают феррониобий. Мощности по производству FeNb составляют 6800 т, планируется их увеличение до 8500 т [TIC].

По ряду перспективных месторождений ниобия крупнейшими мировыми фирмами-производителями ведется комплекс работ по подготовке их к освоению. При увеличении потребности мирового рынка в ниобиевом сырье и продуктах его переработки, эти месторождения могут быть вовлечены в эксплуатацию в короткие сроки, т.к. степень готовности некоторых из них очень высока (пусковые комплексы, опытные установки и т.д.). Наиболее реальным новым источником ниобия является месторождение Kanika (Малави, Африка). Ввод объекта в отработку отложен до 2018-2020 гг. в связи с неблагоприятной рыночной ситуацией и отсутствием инвестора [mininginmalawi.com].

В целом можно констатировать, что мировая сырьевая база ниобия надежна, представлена высококачественными рудами и имеет существенные возможности прироста. Имеющиеся и намечаемые к вводу мощности по производству различных видов ниобиевой продукции вполне смогут обеспечить постоянно увеличивающуюся потребность в этих материалах.

В России в настоящее время ООО «Ловозерский ГОК» ведет разработку ниобийсодержащих руд на Карнасуртском руднике Ловозерского месторождения, с производством лопаритового концентрата, потребителем которого является Соликамский магниевый завод (СМЗ). Разведанных и утвержденных запасов лопаритовой руды Ловозерскому ГОКу хватит на 90 лет.

Лопаритовый концентрат, поставляемый СМЗ, используется для производства технического пентоксида ниобия по хлорной технологии и соединений ниобия высокой степени чистоты. Ниобиевая продукция завода поставляется на предприятия России (26,5%), Америки (69,5%) и европейских стран (4%).

Объем поставок соединений ниобия в пересчете на содержание Nb_2O_5 вырос с 511 т в 2013 году до 580 т в 2014 году. В 2015 г. СМЗ поставил своим потребителям: пентаоксида ниобия технического качества – 608,4 т, соединений для оптики и электроники – 19,7 т [Годовой отчет..., 2016]. Доля СМЗ в объеме производства оксида ниобия в России – 100%.

Лицензия на разработку Татарского месторождения сдана в 2013 г. До этого получаемые на промплощадке месторождения черновые ниобиевые концентраты направлялись на Вишневогорскую обогатительную фабрику для глубокого обогащения с выходом товарного концентрата (60% Nb_2O_5). Товарный концентрат поступал на Ключевский завод ферросплавов для изготовления феррониобия, который поставлялся в ОАО «Северсталь».

В настоящий момент Ключевский завод ферросплавов (КЗФ) является единственным российским предприятием, производящим феррониобий. В 2008 г. ниобиевое сырье (пентоксид ниобия) поставлялось АО «Ульбинский металлургический завод» (Респ. Казахстан). В последние годы начинает использоваться африканское пироклоровое сырье с месторождения Луэш в ДР Конго, освоение которого КЗФ частично финансировал.

В 2011 г. ЗАО «Техноинвест Альянс» подготовлен технический проект освоения Зашихинского месторождения с опытной обогатительной установкой. Запустить ГОК планируется в 2018 году с первоначальной производительностью от 100 до 250 тыс. т руды.

Таким образом, имея мощную сырьевую базу, Россия практически не располагает собственным ниобиевым производством и импортирует ежегодно около 2,5-3 тыс. т ниобия в различной ниобиевой продукции, прежде всего, в феррониобии и ниобийсодержащих сталях (для производства труб большого диаметра, необходимых для ремонта и строительства трубопроводов).

Потребление

Структура потребления на **мировом рынке** в последние годы существенно не меняется (рис. 5.1.1). Превалирующая часть ниобия (85-90%) в виде феррониобия стандартного сорта (HSLA) применяется в производстве стали, остальное – в виде «чистого» ниобия (высокочистые сплавы, соединения и металл) – в сверхжаропрочных сплавах (8-10%) и в других областях:

твердых сплавах, химической аппаратуре, сверхпроводниках, оптике, электронике. Для производства высокочистых ниобиевых продуктов используется пентаоксид ниобия. Структура потребления ниобия при производстве различных сталей и сплавов в 2015 году представлена на рис. 5.1.2.

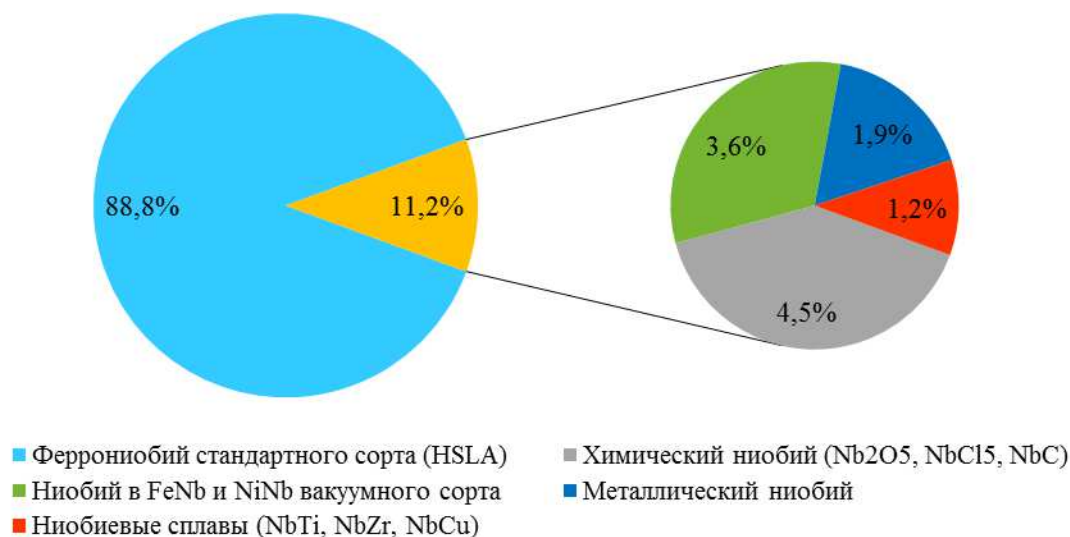


Рис. 5.1.1. Структура мирового потребления ниобия [TIC]

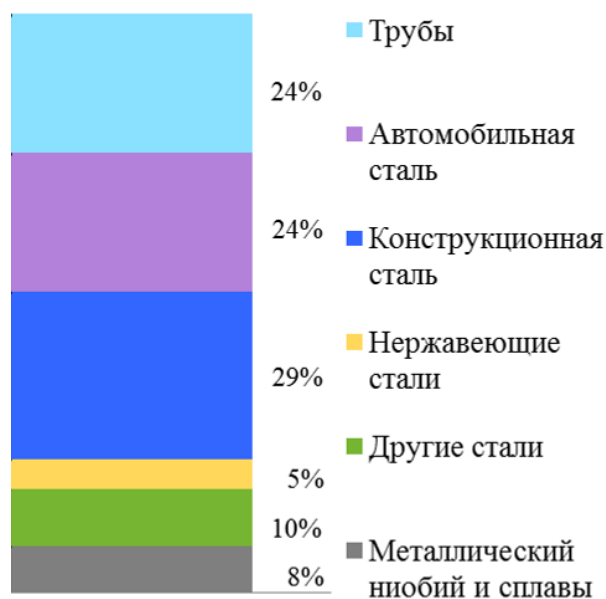


Рис. 5.1.2. Структура мирового производства ниобийсодержащих сталей и сплавов в 2015 г. [TIC]

Крупнейшими потребителями феррониобия в мире являются США, Япония и Китай. В 2009 г. наблюдалось резкое падение спроса на феррониобий (до 35 тыс. т Nb), что привело к значительному снижению его производства компанией CBMM (с целью удержания цен от падения). В 2011 г. уровень потребления металла приобрел докризисные значения (около 56 тыс. т), и в настоящее время остается относительно стабильным (60-65 тыс. т/год).

Рост мирового потребления феррониобия в первую очередь связан с увеличением объемов производства ниобийсодержащих конструкционных сталей [Ниобий..., 2011]. Одновременно с ростом объемов производства стали на потребность в феррониобии влияет его удельный расход на 1 т стали. Эта величина также постоянно увеличивается, и в настоящее время ее среднемировое значение составляет 65 г/т, а в США и Японии этот показатель достигает 100 г/т и выше. В Китае, самом крупном мировом потребителе феррониобия, за последние 5 лет удельная норма его расхода увеличилась более чем в 3 раза, с 11 г/т в 2004 году до 45 г/т в настоящее время [TIC].

Большое количество феррониобия потребляется при производстве труб большого диаметра, используемых для строительства газо- и нефтепроводов. Конкуренция за заказы на данные трубопроводы носит глобальный характер. Среди основных потребителей данной продукции можно выделить: British Gas, Exxon, Газпром, Norwegian Statoil, Petrobras и др. [International Energy Agency].

В ближайшие 3 года общий рост спроса на FeNb оценивается в 15%, из которых 10% составляет увеличение удельного расхода и 5% – рост объемов производства стали.

Наиболее крупными поставщиками на рынок металлического ниобия являются CBMM (Бразилия) и ОАО «СМЗ» (Россия) – AS Silmet (Эстония). Особо чистые соединения поставляются компаниями H.C. Starck (Германия), Cabot Supermetals (США), CBMM (Бразилия), OTIS (Китай), Mitsui Mining&Smelting (Япония) и ОАО «СМЗ» (Россия) – AS Silmet (Эстония).

По данным [TIC], начиная с 2002 г. наблюдается рост мирового потребления металлического ниобия. Потребление ниобия в составе суперсплавов составляет более 50% всего рынка металлического ниобия и является основным фактором влияния на весь рынок «чистого ниобия». Крупным потребителем и импортером металлического ниобия и его химических соединений является США. Объем потребления «чистого» ниобия в мире в 2015 г. составил около 10 тыс. т, при этом около 50% его использовалось для изготовления турбин реактивных самолетов и газовых электростанций.

В целом можно констатировать, что мировая ниобиевая промышленность, несмотря на свою концентрацию, вполне адекватна существующим мировым потребностям и имеет значительные резервы по обеспечению ее роста в перспективе.

Потребление ниобия в **России** постоянно увеличивается: если в начале века в России на 1 т стали расходовалось 8 г ниобия, то уже к середине 2000-х годов потребление феррониобия на ведущих металлургических предприятиях РФ (ОАО «Северсталь», АО «НОСТА») составляло 30-60 г на тонну стали.

Практически весь феррониобий импортируется из Бразилии. В 2012-2015 гг. количество ввозимого сплава, по различным оценкам, колебалось от 3,0 до 4,5 тыс. т [Metal Research].

Основные российские потребители феррониобия:

1. ОАО «Северсталь» (г. Череповец) закупает феррониобий марки ФНб-60 для производства стали для труб большого диаметра, а также широкополосного стана-5000, развивающего производство инновационных видов продукции, в первую очередь для топливно-энергетического и строительного комплексов РФ;

2. Новолипецкий металлургический комбинат производит прокат горячекатаный различных марок (с содержанием 0,008% Nb) и толстолистовой для судостроительной и др. отраслей.

3. ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ» производит прокат листовой и толстолистовой низколегированный различных марок для мостостроения и других ответственных конструкций; трубную заготовку нефтяного сортамента.

4. ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

5. ЗАО «Объединенная металлургическая компания».

6. ЕВРАЗ Групп.

7. ОАО «Мечел».

Ниобий в других соединениях (пентаоксид ниобия, различные сплавы ниобия, чистый ниобий) потребляют: ОАО «Электросталь», ОАО «Ашинский металлургический завод», ОАО «Волгоградский металлургический завод «Красный Октябрь» и др.

Расчет величины текущей потребности России в ниобиевой продукции представлен в таблице 5.1.1 (по данным ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» экспертно по областям применения).

Таблица 5.1.1

Существующий сектор отечественного рынка ниобия

Применение	Марка	Объем производства, млн. т*	Содержание Nb, %	Кол-во Nb, т (в металле)	Кол-во Nb* в FeNb	FeNb, т (станд. 65% Nb)
Трубы большого диаметра	X 80	2,0	0,05	1000	1176	1810
Стали для кораблестроения	ЕН 36 normalized	0,5	0,03	150	175	270
Конструкционные стали	S 355 MC	0,8	0,025	200	235	360
Автомобильные полосы	S 500 MC	0,4	0,04	160	188	290
Автомобильный лист	H 340 LA	1,0	0,04	400	471	725
Жаростойкие стали	1.4509	0,9	0,60	540	635	975
Итого				2450	2880	4430

* Оценка. ** Необходимое количество ниобия с учетом степени его усвоения при выплавке стали – 85%.

Требования промышленности к качеству товарной ниобиевой продукции

При выплавке стали, в основном применяется стандартный феррониобий производства «СВММ» (Бразилия). В табл. 5.1.2 приведен его химический состав согласно спецификации и типичное содержание элементов.

В России феррониобий изготавливают в соответствии с ГОСТ 16773-2003 (табл. 5.1.3).

Таблица 5.1.2

Химический состав феррониобия стандартной марки
производства СВММ

Лимитируемые элементы	Требования спецификации, %	Типичное содержание, %
Nb	$\geq 63,00$	66,50
P	$\leq 0,20$	0,08
S	$\leq 0,10$	0,06
C	$\leq 0,15$	0,08
Pb	$\leq 0,12$	0,04
Si+Al+Ti	$\leq 5,50$	3,00
Fe	Остальное	30,00

Источник: данные СВММ

Таблица 5.1.3

Выписка из ГОСТ 16773-2003: феррониобий

Марка	Nb+Ta	Содержание элементов, %, не более					
		Si	Al	Ti	C	S	P
ФНб 60	55-65	1,5	3,0	1,0	0,1	0,03	0,10
ФНб 58	50-65	2,0	6,0	1,0	0,2	0,03	0,15
ФНб 58(ф)	50-65	2,0	6,0	2,0	0,3	0,05	0,40
ФНб55(ф)	55-65	5,0	8,0	2,0	0,5	0,30	2,00
ФНб 55С	50-65	15,0	4,0	8,0	0,2	0,03	0,30
ФНб 50С	40-65	20,0	6,0	-	0,5	0,05	0,50

Основные особенности формирования цен на ниобиевую продукцию

Характерной особенностью ниобиевого рынка является его монополизация: ситуацию на нем в значительной степени определяет основной продуцент ниобиевой продукции – бразильская компания *СВММ*. При этом, что очень важно, эта компания на протяжении многих лет поддерживает баланс предложения и спроса и проводит взвешенную ценовую политику, что позволяет ей сохранять стабильность на рынке [Козловский и др., 2013].

Ниобиевое сырье в качестве товарного продукта на рынке практически отсутствует. Дело в том, что компании, добывающие это сырье, одновременно являются и его переработчиками на феррониобий и другие соединения ниобия. Поэтому торговля ниобийсодержащими минералами и продуктами на Лондонской бирже металлов не ведется.

Цены на получаемую из пироксеновых концентратов или другого ниобийсодержащего сырья ниобиевую продукцию, такую как пентаоксид ниобия, другие соединения этого металла, металлический ниобий и различные его сплавы, как отмечает «Mining Journal Ltd.», широко варьируются в зависимости от ее характеристик, величины поставляемых партий и метода ее производства и в печати, как правило, не публикуются. Цены обычно устанавливаются в ходе переговоров между покупателем и продавцом.

Важной особенностью рынка ниобиевой продукции является то, что она реализуется по долгосрочным контрактам. В настоящее время такие контракты покрывают 95% продаж. Это предопределяет высокую стабильность цен. Так, с начала 90-х и до середины 2000-х годов уровень экспортных цен феррониобия из Бразилии находился в интервале 12,5-13,5 долл. США/кг ниобия.

Ситуация изменилась в 2007 году, когда цены на FeNb и другие ниобиевые продукты начали резко расти и в 2008 году более чем удвоились. Такое увеличение цены не было, как и прогнозировали эксперты Roskill, временным, и в настоящее время они стабилизировались на следующем уровне: импортные цены бразильского FeNb (в расчете на ниобий) в США – 35-40 долл. США/кг, в Европе – 43-45 долл. США/кг.

Тенденции и прогноз развития мирового и российского рынков ниобия

Мировое потребление ниобия быстро растет, и темпы его роста ускоряются. Если в последние 20 лет они составляли 8,4% в год, то в 2000-2010 гг. – уже 11,4%. Не последнюю роль в этом играли интенсивное промышленное развитие таких динамично развивающихся стран, как Китай и Индия; а также резкие колебания цен на рынке традиционного заменителя ниобия – ванадия. В последние годы темпы роста снизились до 4-6% в год. При текущих и проектируемых темпах роста мировое потребление ниобия к 2020 году может составить до 150 тыс. т в год.

Потребности России в ниобиевом сырье четко неопределенны. Ниобий в виде феррониобия на внутрироссийском рынке является остродефицитным товаром, потребность в котором удовлетворяется за счет импорта. Производство пентаоксида ниобия значительно превышает спрос на внутреннем рынке, в результате чего большая часть этой продукции экспортируется.

С учетом опыта развитых стран можно рассчитывать, что Россия к 2020 г. будет потреблять не менее 5-6 тыс. т ниобия в год, поскольку в стране строятся и нуждаются в замене магистральные нефте- и газопроводы протяженностью в десятки тысяч км.

Прогнозируемое увеличение потребления ниобия в обладающей большим металлургическим потенциалом России также связано с разработкой и реализацией государственной промышленной политики, направленной на кардинальное увеличение конкурентоспособности национальных отраслей, что выразилось в ряде программ, в т.ч. федерального значения: «Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 г.», «Стратегия разви-

тия железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.», «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.», «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» и др.

Таким образом, можно сделать следующие основные выводы.

В мире ниобий широко применяется практически во всех высокотехнологичных областях промышленности, в связи с чем, уровень его потребления является одним из важнейших индикатором развития и конкурентоспособности национальных экономик.

Лидирующее положение в минерально-сырьевой базе ниобия зарубежных стран занимает Бразилия. Россия обладает значительными запасами ниобия и находится на втором месте.

Подавляющая часть добычи этого металла традиционно обеспечивает Бразилия. Канада, второй продуцент ниобия в мире, обеспечивает 9% мировой добычи. В значимых количествах ниобий также добывается в Австралии и ряде африканских стран. В РФ в настоящее время добычу ниобий-содержащих руд осуществляет только ООО «Ловозерский ГОК».

Практически 85-90% всего потребляемого в мире ниобия приходится на феррониобий, остальные 10-15% на ниобий в форме химических соединений и ниобий в металлической форме в составе высокочистых лигатур. Имея мощную сырьевую базу, Россия практически не располагает собственным ниобиевым производством и поэтому вынуждена импортировать различные виды ниобиевой продукции, в основном – феррониобия.

Мировое потребление ниобия за 2002-2010 гг. возросло примерно на 20%. По данным ТИС суммарный объем потребления ниобия в мире в 2014-2015 гг. оценивался в 60 тыс. т содержания Nb, из которых 55 тыс. т Nb было потреблено в виде стандартного феррониобия. Существующая на настоящий момент величина потребности России в феррониобии составляет около 4000-4500 т (~2500-3000 т Nb). Учитывая прогнозируемый к 2020 г. рост потребности можно предположить, что в ближайшие 5 лет величина ежегодного спроса составит 5000-5500 т феррониобия (3300-3500 т Nb).

Цены на все виды ниобиевой продукции долгое время оставались стабильными. Ситуация изменилась к концу 2007 года, когда произошло резкое их увеличение. К концу 2008 г. цены снизились, что связано с мировым экономическим кризисом. В 2009-2011 г. цена на бразильский феррониобий вновь увеличились и в настоящее время составляет 43-45 долл. США/кг.

5.1.2. Краткие обзоры рынков попутной товарной продукции

5.1.2.1. Современная ситуация на рынке апатитовой продукции

Более 95% фосфатного сырья используется для получения фосфатных и комбинированных минеральных удобрений. Остальные 5% идут на производство фосфора и фосфорной кислоты – исходных веществ для получения разнообразных химических соединений, используе-

мых в металлургии, пиротехнике, органическом синтезе, производстве минеральных подкормок для скота и птицы, моющих и огнестойких веществ, спичек, лекарственных препаратов, инсектицидов, флотореагентов, матовых стекол и др.

Фосфатные руды представлены двумя основными группами природных образований – фосфоритами и апатитами. Промышленные типы апатитов и фосфоритов, которые являются или в ближайшей перспективе могут стать поставщиками сырья для фосфатоперерабатывающей промышленности, имеются среди всех генетических групп, но главенствующее значение принадлежит месторождениям экзогенной группы.

Мировые ресурсы пентоксида фосфора (P_2O_5) на суше оцениваются примерно в 78,3 млрд. тонн. Основная их масса приходится на фосфориты, доля апатитовых руд – всего около 7%. По запасам фосфора выделяется Марокко (с Западной Сахарой), где сконцентрировано около 24% мировых запасов пентоксида фосфора. К числу ведущих держателей запасов относятся также Китай, Россия, США, Ирак и Египет.

По запасам фосфатных руд Россия находится на третьем месте в мире. Суммарные балансовые запасы отечественного фосфатного сырья составляют около 1,3 млрд. т P_2O_5 . Особенностью отечественной базы фосфатного сырья является резкое преобладание в ее структуре апатитовой составляющей (82%) над фосфоритовой. Фосфатное сырье России по сравнению с ведущими странами мира характеризуется низким качеством руд за исключением апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений (Мурманская обл.), запасы которых составляют около 40% от общероссийских, и комплексных апатитсодержащих руд Белозиминского месторождения (Иркутская обл.). Среднее содержание пентоксида фосфора на лучших отечественных месторождениях фосфоритов не превышает 13-14%, а на зарубежных месторождениях – 26-28%.

Добычу фосфатных руд и производство фосфорных концентратов систематически осуществляют около 30 стран. Мировые мощности по добыче руд составляют ~200 млн. т.

В 2015 году было произведено 220 млн. т фосфатных концентратов, почти 70% их приходится на долю трех стран: Китая, Марокко и США. Крупнейшими потребителями фосфорных концентратов являются США и Китай, которые используют половину добываемого в мире сырья. Суммарное потребление Марокко, России, Туниса, Бразилии и Индии составляет около четверти мирового.

Добыча фосфатных руд и получение соответствующих концентратов в России осуществляется в основном на рудниках Мурманской области – на месторождениях Хибинской группы (ОАО «Апатит») и на Ковдорском апатит-магнетитовом месторождении (ОАО «Ковдорский ГОК»).

ОАО «Апатит», входящий в состав холдинга «Фосагро», эксплуатирует шесть месторождений Хибинской группы: Кукисвумчорское, Юкспорское, Апатитовый Цирк, Плато Расвум-

чорр, Коашвинское и Ньюркапхское. Среднегодовая мощность оборудования фабрик составляет 10,2 млн. т апатитового концентрата. В связи с ограничением возможности по добыче руды используемая среднегодовая мощность обогатительного производства не превышает 8,0 млн. т.

АО «СЗФК», получившее в 2006 г. лицензию на право пользования недрами месторождений апатит-нефелиновых руд Олений Ручей и Партомчорр, с 2013 г. полностью обеспечивает потребности российских химических предприятий Группы «Акрон» в фосфатном сырье, а также отгружает апатитовый концентрат сторонним потребителям. Годовая мощность по производству концентрата составляет 1,1 млн. т.

ОАО «Ковдорский ГОК», входящий в структуру МХК «Еврохим», получает апатитовый концентрат (около 2,5 млн. т/год) из хвостов железорудного производства.

Россия ежегодно экспортирует ~25% произведенного апатитового концентрата.

Подавляющая часть фосфорных концентратов используется для производства фосфорных удобрений. Общемировой тенденцией является сближение районов производства фосфорных концентратов и их переработки.

Около 74% выпускаемых в мире фосфорных удобрений произведено в четырех странах: США, Китае, Индии и России. Аналогична ситуация и в производстве фосфорной кислоты: на Китай, США, Марокко и Россию приходится до 70% их мирового производства.

Фосфорные удобрения в России производят 15 предприятий, которые выпускают около 2,6-2,8 млн. т продукции ежегодно. Уровень использования мощностей в производстве фосфорных удобрений в среднем по России едва превышает 50%.

Начатая в 2012 г. либерализация российского рынка апатитового концентрата, подразумевающая формирование цен на последний по специальным формулам, рекомендованным ФАС (Федеральной антимонопольной службой), продолжается до сих пор. По состоянию на начало 2015 года рассчитанная по формуле ФАС цена апатита для российских потребителей составляет около 5500 руб./т; для отдельных потребителей цена снижена до 4500-5000 руб./т. При этом экспортная цена апатита у «Фосагро» превышает 7000 руб.

Минеральные удобрения являются одной из важнейших статей экспорта РФ. На экспорт поставляется более 85% объема производимых в России удобрений. По экспорту фосфорных удобрений Россия занимает второе место в мире после США. Главными видами экспортируемых удобрений являются аммофос и диаммофос.

Удельные уровни внесения минеральных удобрений в России одни из самых низких: внесение фосфорных удобрений на 1 га пашни не превышает 5 кг, в то время как в бывшем СССР эта норма достигала 42 кг, а в развитых европейских странах она составляет 150-180 кг. Отечественными сельхозпроизводителями потребляется всего 2,3 млн. тонн удобрений в год. При этом по оценкам экспертов, все сельхозпроизводители России должны вносить в сумме

10 млн. тонн удобрений в год при соблюдении всех норм ($\sim 3,0$ млн. т в год P_2O_5). При этом на долю регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов приходится не более 30 тыс. т P_2O_5 в связи с низким платежеспособным спросом местных сельхозтоваропроизводителей. Научно обоснованная потребность почв данных округов, по разным оценкам, составляет от 250 до 1100 тыс. т P_2O_5 .

5.1.2.2. Современная ситуация на рынке полевошпатовой продукции

В промышленности широко используются калий-натриевые полевые шпаты, основная область применения которых – производство керамической и стекольной продукции.

Полевошпатовое сырье в природном виде, как правило, не соответствует требованиям промышленности. Качество сырья определяется минимальными массовыми долями оксидов железа (в большинстве случаев менее 0,15-0,30%), щелочных и щелочноземельных компонентов, а также калиевым модулем ($K_2O:Na_2O$). Следует отметить, что при очень широком распространении полевошпатовых пород в земной коре промышленное производство во всем мире испытывает недостаток в наиболее качественном сырье с высоким калиевым модулем (более 3). Наиболее качественными полевошпатовыми материалами являются микроклиновые (высококалиевое полевошпатовое сырье), реализуемые в кусковом (20-200 мм) или молотом виде.

По данным Геологической службы США мировое производство полевошпатовой продукции выросло с 9,5 млн. т в 2000 г. до 22 млн. т в 2008 г. В последующие годы оно сократилось до 20 млн. т в связи с падением производства в отраслях, потребляющих полевошпатовые материалы, и в настоящее время составляет около 21,5 млн. т. На долю 3-х стран: Италии, Турции и Китая, в последние 3 года суммарно приходится около 55-60% мировой добычи данного минерального сырья. По оценкам «Инфомайн», суммарный объем добычи полевого шпата в странах СНГ (с учетом России) в 2010-2014 гг. составлял около 1 млн. т.

Средние цены на полевошпатовую продукцию, производимую в США, в 2011 г. достигли уровня 78\$/т, а в 2012-2014 гг. стабилизировались на уровне ~ 70 \$/т (франко-предприятие). Цены на полевые шпаты в других странах в зависимости от типа, качества и крупности колеблются от 22 до 180 долл. США за т.

В России более 60% балансовых запасов полевошпатового сырья сосредоточено в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО), однако основные производственные мощности находятся в Уральском ФО. Запасы высококалиевого микроклинового сырья представлены в основном микроклиновыми пегматитами и сосредоточены в Северо-Западном (Мурманская область, Республика Карелия) и Сибирском (Иркутская область) федеральных округах. В настоящее время добычу микроклинового пегматита ведет ООО «Чупинское ГРП» на месторождении Хетолаамбино (Респ. Карелия).

Основными потребителями российского полевого шпата являются Белоруссия (до 70% экспорта) и Украина (25-27% экспорта). Небольшие объемы полевошпатовых концентратов поставляются в Казахстан, Киргизию, Литву, Азербайджан и Италию.

В настоящее время емкость российского рынка высоко- и среднекачественной полевошпатовой продукции (к которой относятся и микроклиновые концентраты) можно оценить примерно в 25-30 тыс. т в год с перспективой роста потребления к 2020 году до 80-90 тыс. т/год.

5.1.2.3. Современная ситуация на рынке редкоземельной продукции

По совокупности, примерно 55% РЗЭ используется в оптике, электронике и электротехнической промышленности, 15% в катализаторах, 15% в производстве стекла и керамики, 10% в металлургии и 5% прочие области применения [Редкие металлы..., 2008].

Основными источниками РЗМ являются минералы бастнезит (фторокарбонат редкоземельных металлов), монацит, лопарит и ионно-абсорбционные руды. Однако в мире имеется лишь небольшое число рентабельных для разработки месторождений этих минералов. Наибольшая часть мировых запасов редкоземельных металлов сосредоточена на бастнезитовых месторождениях КНР (доля в мировых 42%). На втором месте в мире находится **Россия**. Крупные запасы редких земель находятся также в Австралии, Бразилии, КНР, Индии, Малайзии, ЮАР, Шри-Ланке, Таиланде и США.

Мировая добыча редких земель в последние полтора десятилетия росла весьма быстрыми темпами. За период с 1990 г. по 2004 г. она увеличилась примерно вдвое. В 2014 г. производство редкоземельных металлов, по оценке USGS, с учетом России, составило 163 тыс. т (рис. 5.1.3), более 50% которого было потреблено Китаем (100 тыс. т из 150 тыс. т оксидов РЗМ).

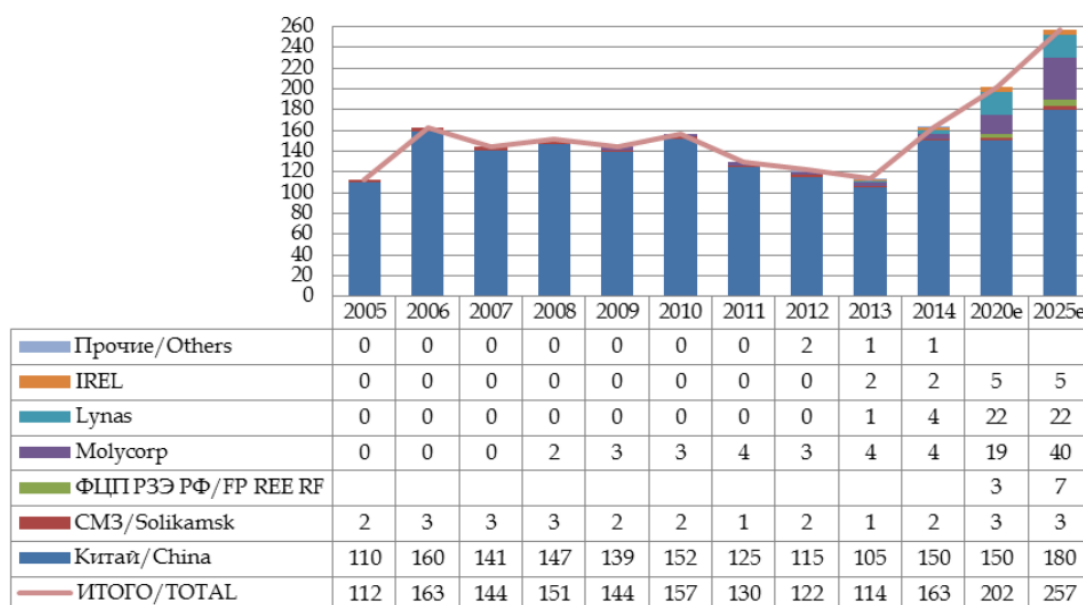


Рис. 5.1.3. Объем производства РЗЭ в мире и прогноз до 2025 г, тыс. т TREO

В России основная часть редких земель добывается в Мурманской области компанией ОАО «Апатит» в процессе разработки на фосфорное сырье шести месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинской группы, но при переработке они не извлекаются. В настоящее время активно проводятся исследования, направленные на решение данной проблемы за счет попутного извлечения редких земель при переработке апатитового концентрата на удобрения.

Компания ООО «Ловозерский ГОК» занимается разработкой Ловозерского месторождения лопаритовых руд, содержащих оксиды РЗМ преимущественно цериевой группы. Переработка руд производится на Карнасуртской обогатительной фабрике, где из них получают лопаритовые (титан-тантал-ниобий-редкоземельные) концентраты. Они являются сырьем для редкоземельного производства ОАО «СМЗ». В 2014 г. было переработано 7,7 тыс. т концентратов, из которых получены карбонаты и оксиды РЗМ, содержащие 2,1 тыс. т триоксидов РЗМ; 109,8 т из них поступило на внутренний рынок

После скачка цен на РЗМ в 2010-2011 гг. последовало их значительное снижение, продолжившееся и в 2015 г. По состоянию на 30.12.2015 г. установились следующие цены на оксиды РЗМ (долл. США/кг): церий – 1,8; лантан – 4,0; празеодим – 50,0; неодим – 42,0; самарий – 2,0; европий – 96,0; гадолиний – 11,6; диспрозий – 216,0; эрбий – 44,0; тербий – 400,0; иттрий – 38,0 [www.infogeo.ru].

В последние годы наибольшим спросом в мире пользовались триоксиды европия и неодима. Внутреннее потребление редких земель в России при производстве промышленной продукции на протяжении многих лет не превышает 2-3 тыс. т в год. Спрос на них большей частью удовлетворяется продукцией, импортируемой из Китая; некоторые индивидуальные редкоземельные элементы закупаются в странах ЕС.

По прогнозу Beijing Antaike, IMCOA потребления РЗЭ в мире в 2020 г. составит 300 тыс. т оксидов РЗМ, из них 195 тыс. т потребит Китай.

5.1.2.4. Современная ситуация на рынке урана

Основное применение урана – производство ядерного топлива для АЭС. Добыча урана ведется в международном масштабе небольшим числом компаний, работающих всего в нескольких странах. По данным Всемирной ядерной ассоциации (ВЯА), в 2014 году в мире было произведено около 56,3 тыс. т урана. На основе анализа действующих и планируемых производств ВЯА разработала три сценария производства на период до 2035 года. Согласно базовому сценарию, производство урана в мире достигнет 71 тыс. тонн урана в 2025 году, а затем снизится до 53 тыс. тонн урана в 2035 году.

После резкого увеличения цен на уран в 2007 году наблюдался их постепенный спад с достижением минимального значения в 2016 году, когда они дошли до рекордно низкой отметки в 18\$/фунт (40\$/кг). В настоящее время стоимость U_3O_8 составляет ~52,5\$/кг.

5.2. Оценка экономической эффективности освоения Большетагнинского месторождения ниобия на основе принятых технологических решений

Геолого-экономическая оценка месторождения выполнена в соответствии с законом Российской Федерации «О недрах» и другими законодательными и правительственными актами по рациональному и комплексному использованию недр [Закон..., 1992, Методические рекомендации..., 1999, 2000, 2008]. В основу оценки заложены следующие технологические решения по добыче и переработке руд объекта.

Отработка руды открытым способом с осуществлением на борту карьера крупнопорционного радиометрического разделения добытой руды на два технологических типа (микроклининовый и слюдитовый) и крупнокускового радиометрического обогащения (РРО) каждого из типов руды с выделением отвальных хвостов. Концентраты РРО автомобильным транспортом доставляются на промплощадку, на обогатительную фабрику (ОФ) в отделение рудоподготовки; после рудоподготовки концентраты подвергаются глубокому обогащению методом флотации и магнитной сепарации, в результате которого получены три продукта: пироклоровый и апатитовый концентраты и микроклиновый продукт. Апатитовый концентрат является товарным продуктом, а пироклоровый и микроклиновый концентраты требуют химико-металлургической переработки. Химико-металлургическую переработку пироклорового концентрата и доводку микроклинового продукта предполагается осуществлять на промплощадке в соответствующем цехе. Полученные микроклиновый и урановый концентраты являются товарной продукцией, а пентаоксид ниобия направляется в металлургический цех на выплавку феррониобия.

В соответствии с принятыми горнотехническими и технологическими решениями отработку месторождения планируется осуществлять в два этапа:

– на первом этапе (1 очередь эксплуатации) производится отработка открытым способом запасов ниобиевых руд микроклининового и карбонатит-слюдитового типов (в соотношении 3:1), находящихся в границах карьера 1 очереди;

– на втором этапе (2 очередь эксплуатации) производится отработка открытым способом запасов ниобиевых руд микроклининового и слюдитового типов (примерное соотношение 1:1), включаемых в границы Большого карьера и находящихся за границами карьера 1 очереди.

Производительность горно-обогатительного предприятия по добыче руд, равная 1 млн. т в год, принята исходя из достижения объема производства основной товарной продукции (феррониобий) равного существующей величине внутреннего спроса на феррониобий, с учетом его прогнозируемого роста. Показатели экономической, бюджетной и коммерческой эффективности проекта вычисляются по предприятию в целом.

Снабжение месторождения оборудованием, материалами, электроэнергией и продовольствием будет осуществляться от ж/д станции Тулун. В районе ж/д станции Тулун создается входная база в составе складов МТС и готовой продукции. Для приема и отправки грузов предусмотрено строительство своего путевого хозяйства с примыканием его к сетям МПС. Также с целью обеспечения стабильного снабжения месторождения оборудованием, материалами, электроэнергией и продовольствием проектом предусматривается строительство/реконструкция следующих объектов внешней инфраструктуры:

- строительство ЛЭП 110 кВ от сетей ОАО «Иркутскэнерго» от г. Тулун до основной промплощадки месторождения (160 км);
- реконструкция автодороги «Харанты – Тулун» (160 км) и строительство участка автодороги «Харанты – Большая Тагна» (19 км).

Расчеты на горизонте оценки выполнены в постоянных ценах отдельно по каждому из этапов отработки (табл. 5.2.1). Капитальные вложения и текущие расходы предполагается осуществить за счет собственных средств недропользователя. При определении показателей экономической эффективности величина дисконта принималась в размере 10% и 15%.

Курс доллара США в среднем за последние полгода (окт. 2016 г. – март 2017 г.) составил около 60 руб. При этом довольно продолжительное время (2000-2013 гг.) курс был относительно стабилен и колебался в районе 30 руб. Столь значительное падение курса рубля предопределило повышение цен на производимую продукцию во многих сегментах отечественной промышленности, что, в первую очередь, связано с существующей зависимостью российских предприятий от зарубежных поставщиков сырья и материалов. Поэтому в последнее время стал так актуален вопрос возможности импортозамещения.

Феррониобий является одним из таких продуктов: потребность страны в нем практически полностью удовлетворяется за счет импортных поставок. После скачка цен на феррониобий в 2008 г. его цена стабилизировалась на уровне 40-45\$/кг Nb (1200-1350 руб./кг Nb). В настоящее же время в связи с изменением курса валют последняя величина увеличилась более, чем в 2 раза, при стабильной цене в иностранной валюте. Импортозамещение иностранной продукции отечественной может решить данную проблему.

Но при этом необходимо помнить, что планы по реализации импортозамещения в России смогут осуществиться, если цена на отечественную продукцию будет конкурентоспособной. В связи с этим при экономических расчетах цена на товарные продукты принималась с условием ее внутреннего потребления и учетом интересов потенциальных потребителей.

Так, в течение 2008-2013 гг. российским металлургическим предприятиям-потребителям феррониобия в рублевом эквиваленте данный сплав обходился в 1200-1350 руб./кг Nb. При проведении экономической оценки Большетагнинского месторождения ниобия, разработка

которого позволит полностью удовлетворить текущий спрос на феррониобий, уровень принимаемых цен ориентирован именно на эти значения. То же касается цен на нерудную продукцию – апатитовый и микроклиновыи концентраты. К тому же объемы производства микроклинового концентрата из одноименного продукта обогащения снижены в соответствии с текущей величиной спроса внутри страны на высококачественную полевошпатовую продукцию.

Таблица 5.2.1

**Основные технико-экономические показатели промышленного освоения
Большетагнинского месторождения по двум этапам отработки**

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Очередь отработки	
			1 карьер	2 карьер
1	Геологические запасы в карьерах: - руды микроклинитовые слюдитовые	тыс. т	17930,80 12756,23 5174,57	24868,11 14648,39 10219,72
2	Среднее содержание Nb ₂ O ₅ в разведанных запасах в микроклинитах в слюдитах	%	0,915 0,945 0,840	0,992 0,969 1,025
3	Потери при добыче	%	5,05	4,61
4	Разубоживание	%	3,54	3,19
5	Эксплуатационные запасы: - руды микроклинитовые слюдитовые	тыс. т	17650,11 12556,54 5093,57	24503,35 14433,53 10069,82
6	Средние содержания полезных компонентов в эксплуатационных запасах - Nb ₂ O ₅ в микроклинитах в слюдитах - P ₂ O ₅ - микроклина в микроклинитовых рудах	% % %	0,887 0,916 0,815 4,07 69,26	0,989 0,956 1,011 3,69 69,26
7	Коэффициент вскрыши	м ³ /т	0,69	1,12
8	Годовая производственная мощность предприятия по добыче и переработке руды микроклинитовые слюдитовые	тыс. т	1000 750 250	1072 603 469
9	Срок обеспеченности рудника запасами	лет	18	23
10	Извлечение Nb: - при глубоком обогащении - при химико-металлургической переработке - при металлургическом переделе	%	61,23 93,6 95,0	53,43 91,0 95,0
11	Сквозное извлечение Nb в феррониобий	%	54,4	46,2
12	Сквозное извлечение P ₂ O ₅ в апатитовый к-т	%	39,3	30,3
13	Выпуск товарной продукции за год - Nb в феррониобии (ФНб60) - апатитовый концентрат (36,5% P ₂ O ₅) - микроклиновыи концентрат - U ₃ O ₈ в урановом концентрате	т тыс. т т	3390,0 43,2 30,0 15,0	3392,0 32,5 30,0 13,2

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Очередь отработки	
			1 карьер	2 карьер
14	Капитальные затраты, всего в т.ч.: - подготовка территории - добыча - переработка - объекты различного назначения - внеобъемные и прочие затраты в т.ч. экологические	млн. руб.	9039,7 117,7 509,5 3366,6 4534,3 511,7 341,1	4831,4 87,9 598,7 2511,1 1360,2 273,5 182,3
15	Оборотные средства	млн. руб.	520,6	596,9
16	Капвложения в реновацию основных фондов	млн. руб.	2834,3	-
17	Удельные капиталовложения на 1 т годовой мощности по добыче руды	руб.	9039,7	4506,9
18	Цена 1 т продукции Nb в феррониобии апатитовый концентрат микроклиновыи концентрат U ₃ O ₈ в урановом концентрате	тыс. руб.		
			1270,0	
			4,0	
			3,5	
			3100,0	
19	Годовая стоимость товарной продукции в т.ч. Nb в феррониобии	млн. руб.	4628,6 4305,3	4588,0 4307,8
20	Годовые эксплуатационные расходы - в т.ч. амортизация	млн. руб.	2603,0 678,5	2984,5 430,1
21	Себестоимость переработки 1 т руды	руб.	2603,0	2784,1
22	Затраты на 1 руб. товарной продукции	руб.	0,564	0,650
23	Годовая балансовая прибыль	млн. руб.	2025,7	1603,4
24	Годовая чистая прибыль	млн. руб.	1509,2	1223,2
25	Годовой доход	млн. руб.	2187,7	1653,3
26	Бюджетная эффективность (годовая)	млн. руб.	852,0	580,0
27	Горизонта расчета интегральных показателей	лет	19,0	
	в т.ч. срок строительства	лет	1,5	
	срок эксплуатации	лет	17,5	
28	Норма дисконтирования	%	15	
29	Дисконтированная сумма инвестиций	млн. руб.	8325,5	
30	Чистый дисконтированный доход	млн. руб.	2244,9	
31	Индекс доходности	доли ед.	1,27	
32	Внутренняя норма доходности	%	20,3	
33	Дисконтированный срок окупаемости первоначальных капитальных вложений	лет	10	

Проведенная экономическая оценка эффективности промышленного освоения Больше-тагнинского месторождения дала положительные результаты. Годовой доход предприятия на первом этапе будет составлять около 2,2 млрд. руб., при бюджетной эффективности 0,85 млрд. руб. появляется возможность создания в регионе 960 рабочих мест. При ставке дисконтирования 15% достигнуты следующие интегральные показатели эффективности: ЧДД – 2245 млн. руб., ИД – 1,27, ВНД – 20,3%, срок окупаемости – 10 лет.

Результирующие технико-экономические показатели по 2-ой очереди эксплуатации месторождения снижаются в среднем на 20%. К этому приводит, с одной стороны, рост величины годовых издержек производства, связанный, в первую очередь, с увеличившимися расходами на горные работы и первичное обогащение добытых руд; с другой стороны, оставшаяся на прежнем уровне стоимость годового выпуска товарной продукции. Тем не менее, показатели экономической эффективности проекта характеризуются приемлемыми величинами, а учитывая небольшой срок окупаемости инвестиций, предприятие начнет приносить доход уже с 4-го года эксплуатации.

Таким образом, выполненные исследования позволяют оценить Большетагнинское месторождение как объект, промышленное освоение которого возможно с высокой экономической эффективностью. Отработка месторождения удовлетворит потребность России в ферро-ниобии на срок более 40 лет, обеспечит отечественные электрокерамические, фарфорофаянсовые и других производства высококачественным микроклиновым концентратом и снизит дефицит в фосфорных удобрениях Сибири и Дальнего Востока.

5.3. Разработка геолого-экономической модели Большетагнинского месторождения

Модель в широком смысле – это любой образ, аналог мысленный или установленный, изображение, описание, схема, чертеж, карта и т. п. какого либо объема, процесса или явления, используемый в качестве его заменителя или представителя. Сам объект, процесс или явление называется оригиналом модели.

Моделирование – это исследование какого-либо объекта или системы объектов путем построения и изучения их моделей. Это использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов. При исследовании сложное реальное явление заменяется упрощенной копией, которая отражает существенные черты оригинала и позволяет разобраться в его механизме, дает возможность предсказать его изменение [Ван-Ван-Е, 2011, Дубов, 1986, Клейнер, 2001, Мендель, 2012, Петров, 1996, Попов, 2013].

Основными целями моделирования являются:

- понимание устройства объект (его структура, свойства, законы развития, взаимодействия с окружающим миром и т.п.);
- поиск путей управления объектом и определение наилучших стратегий;
- прогнозирование последствий тех или иных воздействий на объект.

При построении модели изучаемого объекта выделяют те его особенности, черты и детали, которые с одной стороны содержат более или менее полную информацию об объекте, а с другой допускают математическую формализацию, т.е. связь между ними можно выразить с

помощью математических отношений: равенств, неравенств, уравнений. Непосредственно процесс моделирования представлен на рис. 5.3.1.

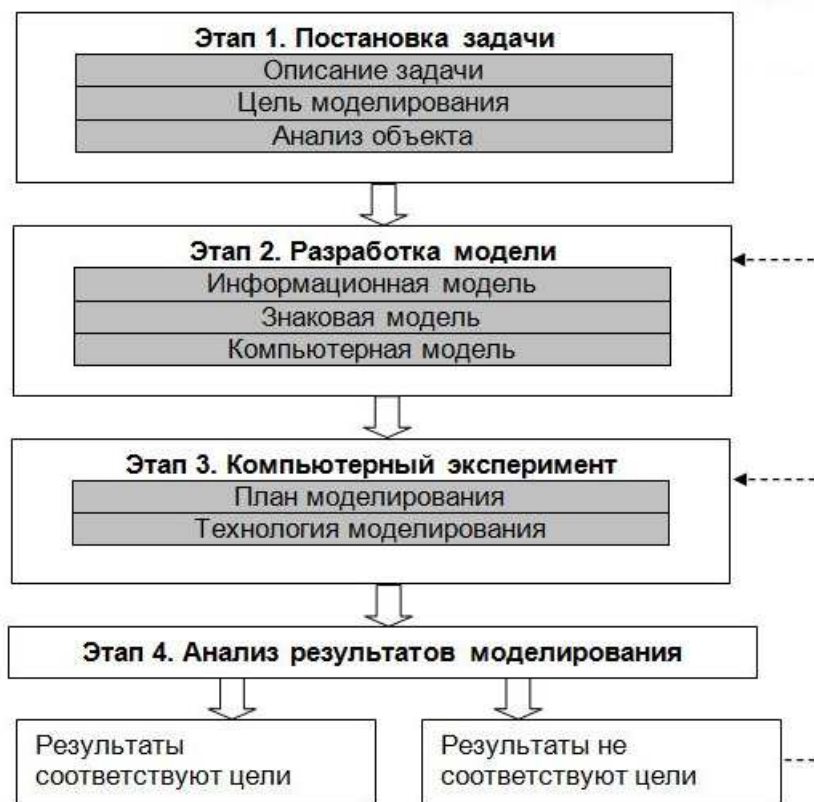


Рис. 5.3.1. Основные этапы моделирования

Целью построения геолого-экономической модели Большетагинского месторождения является определение сильных и слабых сторон его инвестиционного проекта и разработка эффективной стратегии его освоения, как отдельного объекта, так и совместно с другими объектами Зиминского рудного района.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ всего спектра факторов, влияющих на эффективность освоения объекта;
- выделение наиболее влияющих на проект факторов и количественная оценка степени влияния каждого из них;
- оценка «запаса прочности» проекта путем моделирования нескольких наиболее вероятных вариантов изменения совокупности факторов;
- проработка возможных вариантов совместного освоения рассматриваемого месторождения с другими сырьевыми объектами рудного района в целом.

Для решения поставленных задач используется ситуационный подход. Т.е. при решении каждой задачи рассматривается конкретная ситуация - конкретный набор обстоятельств/факторов, которые влияют на организацию в данное конкретное время. Как и системный, ситуационный подход не является простым набором предписывающих руководств, это скорее способ

мышления об организационных проблемах и их решениях. Он пытается определить, каковы значимые переменные ситуации и как они влияют на эффективность организации.

Геолого-экономическая модель (ГЭМ) Большетагнинского месторождения строится на основе рассмотренных ранее (см. Раздел 5.2) показателей освоения объекта, а также привлеченных из различных источников данных по другим месторождениям Зиминского рудного района, актуализированных для современных экономических условий. За базовый вариант модели приняты технико-экономические показатели, характеризующие эффективность освоения объекта на первом этапе (1 очередь эксплуатации), представленные в табл. 5.2.1. Компьютерная модель разработана в программе MS Excel.

В рамках данной ГЭМ проанализировано влияние на эффективность освоения Большетагнинского месторождения ниобия изменения как общих специфических для горных предприятий факторов, так и факторов, специфичных для рассматриваемого объекта. В целом они поделены на 3 группы:

- внутренние факторы, в основном, являющиеся результатом управленческих решений и, как правило, контролирующиеся руководством предприятия;
- внешние факторы, которые находятся за пределами предприятия и не контролируются им, но могут на него воздействовать. Способность организации реагировать и справляться с этими изменениями внешней среды является одной из наиболее важных составляющих ее успеха;
- возможность освоения месторождения совместно с другими объектами района.

Ниже произведен анализ каждой из перечисленных групп факторов.

5.3.1. Моделирование вариантов изменения внутренних факторов

Внутренняя среда предприятия формируется под влиянием факторов внешней среды, государственного регулирования, а также принятия множества управленческих решений внутри самого предприятия с целью достижения наилучших результатов хозяйственно-финансовой деятельности. Внутренняя среда находится под непосредственным контролем аппарата управления и состоит из множества взаимосвязанных групп факторов. Одними из наиболее важных являются производственно-технические факторы, обеспечивающие непосредственно процесс изготовления товара. На все составляющие внутренней среды большое влияние оказывают технологии, которые применяются на предприятии. Анализ внутренних факторов позволяет определить внутренние возможности, потенциал, на который предприятие может рассчитывать в конкурентной борьбе для достижения поставленных целей.

К основным внутренним факторам, влияющим на эффективность освоения Большетагнинского месторождения ниобия, отнесены:

- размер эксплуатационных затрат;
- размер капитальных затрат;

- годовая производительность по добыче и переработке руд;
- величина сквозного извлечения основного полезного компонента – ниобия.

Первые три фактора связаны с общими специфическими для горной отрасли рисками: возможным изменением годовой производительности по добыче руд (например, в связи с не подтверждением запасов) и инвестиционных и эксплуатационных затрат (в связи изменением цен на материально-технические ресурсы и услуги, используемые предприятием в своей деятельности, или сменой их поставщиков).

Величина сквозного извлечения ниобия в конечную товарную продукцию является специфическим для данного проекта фактором. Она, в первую очередь, зависит от степени проработанности применяемой технологии обогащения руд и последующей переработки концентратов.

Оценка степени влияния каждого из перечисленных факторов на эффективность проекта в целом производилась путем расчета величины чистого дисконтированного дохода (ЧДД) при изменении каждого из них в отдельности. График устойчивости ЧДД приведен на рис. 5.3.2.

Проведенный анализ внутренних факторов показал, что наиболее сильно из них на эффективность проекта влияет размер эксплуатационных затрат и величина сквозного извлечения ниобия в феррониобий. В связи с этим руководство будущего предприятия должно уделять особое внимание вопросу технологии переработки руд и оптимизации ежегодных издержек производства.

5.3.2. Моделирование вариантов изменения внешних факторов

Внешняя среда предприятия – это все условия и факторы, которые возникают независимо от деятельности предприятия, но оказывают существенное воздействие на него. Факторы внешней среды являются неконтролируемыми со стороны предприятия, поэтому под влиянием таких событий руководителям приходится изменять внутреннюю организационную структуру, приспособлявая ее под изменившиеся условия.

Внешние факторы обычно делятся на две группы: факторы прямого воздействия (ближайшее окружение) и факторы косвенного воздействия (макроокружение). К первой группе относятся поставщики ресурсов, потребители, конкуренты и т.п.; ко второй – политическая, экономическая, социальная ситуация в стране, скорость развития техники и технологии и т.д.

Анализ внешних факторов позволяет выявить благоприятные возможности и потенциальные угрозы, и на основе полученных результатов осуществлять стратегическое планирование деятельности организации.

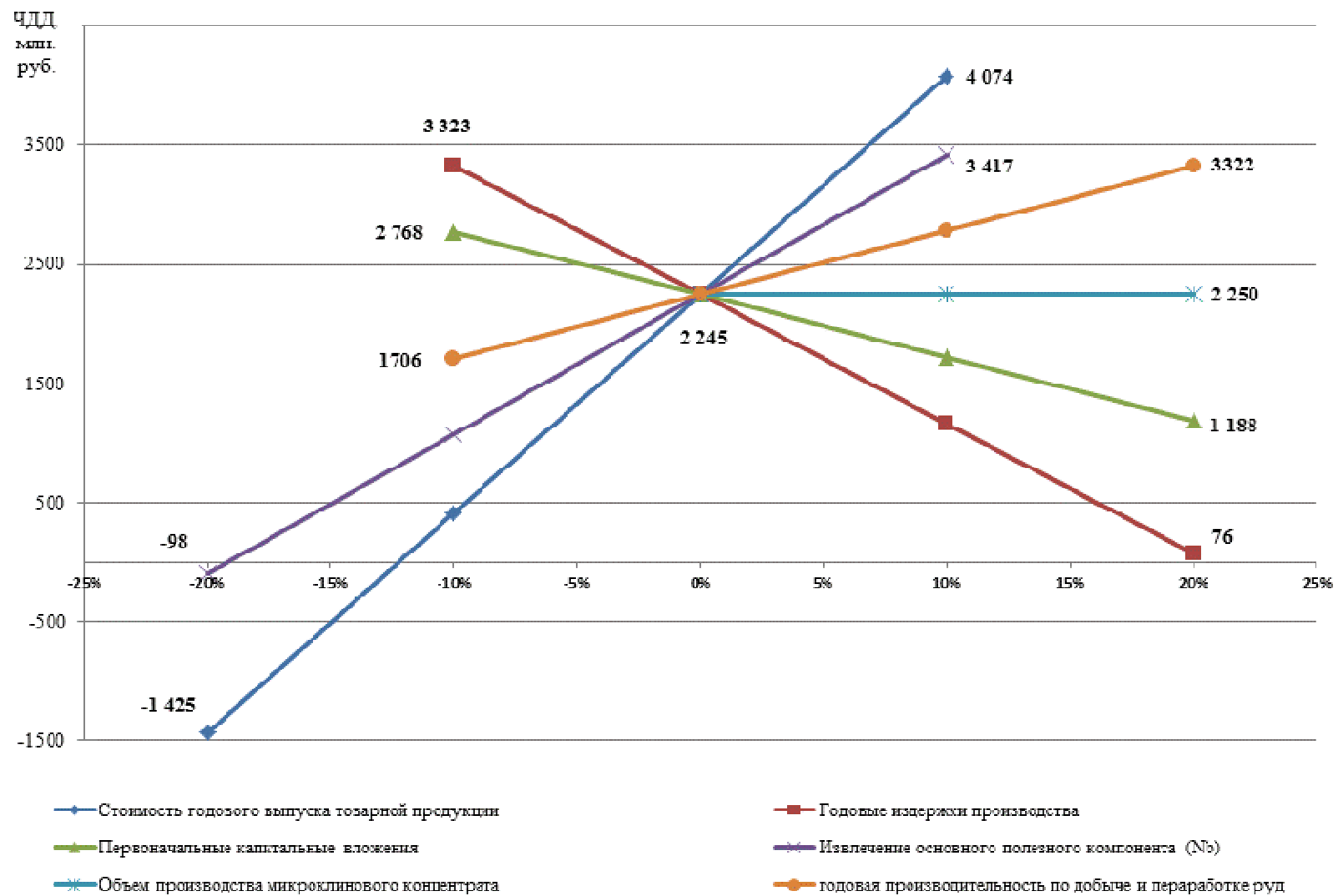


Рис. 5.3.2. График изменения ЧДД в зависимости от изменения различных факторов

К основным внешним факторам, влияющим на эффективность обработки Большетагнинского месторождения, отнесены:

- наличие спроса на товарную продукцию;
- уровень цен на товарную продукцию;
- изменение налоговой политики государства (налоговое льготирование).

Все перечисленные факторы связаны с особенностями данного проекта. Так наличие спроса на попутную товарную продукцию и ее цена во многом зависит как от платежеспособности потенциальных региональных потребителей (для апатитового концентрата), так и от темпов роста производства в керамической и стекольной промышленности (для микроклинового концентрата). Что касается цен на феррониобий, они практически полностью зависят от ценовой политики монополиста на мировом рынке ниобиевой продукции – компании СВММ. В связи с чем, при снижении их до уровня, близкого к себестоимости получения отечественного феррониобия, может появиться необходимость налогового льготирования производителя с целью государственной поддержки развития редкометалльной промышленности страны [Государственная программа..., 2014].

Оценка степени влияния каждого из перечисленных факторов на эффективность проекта в целом, так же как и в случае с внутренними факторами, производилась путем расчета величины чистого дисконтированного дохода (ЧДД) при изменении каждого из них в отдельности. График устойчивости ЧДД приведен на рис. 5.3.2.

Из проанализированных факторов наиболее значимыми являются уровень цен на основную товарную продукцию – феррониобий, доля которого в стоимости годового выпуска составляет более 90%. Следовательно, можно сделать вывод о том, что потенциальным риском при осуществлении проекта может стать снижение стоимости феррониобия. При этом эффективность производства может сохраниться при государственной поддержке предприятия путем предоставления ему налоговых льгот.

После выделения наиболее значимых для проекта факторов с целью оценки «запаса прочности» проекта был проведен анализ совокупного одновременного влияния нескольких из них. Для этого смоделировано несколько возможных сценариев развития внутреннего и внешнего окружения проекта, а именно:

а) *изменение величины эксплуатационных и капитальных затрат*, как правило, имеет обратную зависимость – более дешевое оборудование требует больших затрат на обслуживание и в целом менее технологичное и наоборот;

б) *изменение стоимости годового выпуска товарной продукции и налоговой нагрузки предприятия*: при значительном снижении цен на основную товарную продукцию – феррониобий, и учитывая соответствие проекта целям Подпрограммы 15 «Развитие промышленности

редких и редкоземельных металлов» [Государственная программа..., 2014], возможна государственная поддержка предприятия путем льготирования его, например, по налогу на прибыль;

в) *изменение спроса на феррониобий и микроклиновый концентрат* учитывает возможность появления инновационного продукта-заменителя ниобия, но при этом увеличение объемов сбыта высококачественной полевошпатовой продукции (микроклинового концентрата) как внутри страны, так и за рубеж;

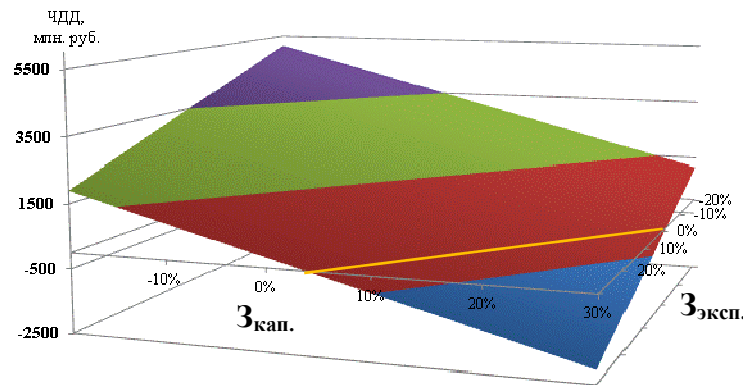
г) *изменение величины капитальных затрат и объема производства микроклинового концентрата при реализации апатитового концентрата по себестоимости* – данный сценарий учитывает возможную погрешность при расчете суммарных инвестиций для реализации проекта, низкую платежеспособность сельхозтоваропроизводителей Сибири и Дальнего Востока и современную структуру потребления полевошпатового сырья в стране (см. Раздел 5.1.2).

Методика оценки представленных сценариев аналогична применяемой ранее – рассчитывается величина чистого дисконтированного дохода, но теперь при одновременном изменении двух факторов. На основе полученного массива данных строится поверхностная диаграмма, позволяющая выявить оптимальные комбинации анализируемых факторов.

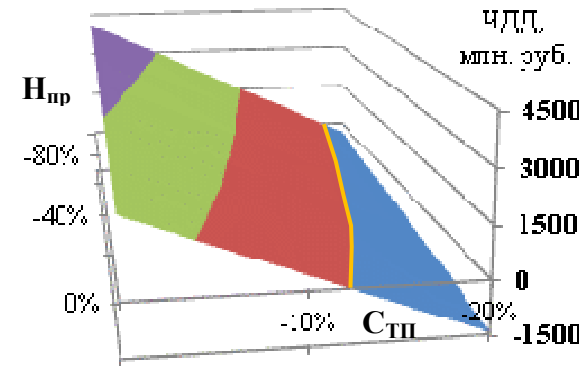
На рис. 5.3.3(а) представлены результаты анализа первой комбинации факторов окружающей среды предприятия. В результате проведенной оценки удалось выявить оптимальный диапазон изменения факторов, позволяющий оставаться инвестиционному проекту экономически эффективным. Например, увеличение капитальных затрат на 20% оправдано, если эксплуатационные затраты при этом понизятся не менее чем на 13%. Также проведена критическая граница, показывающая при каких изменениях факторов ЧДД становится равным 0, а проект оказывается на грани окупаемости. При данном сценарии в рассматриваемом диапазоне изменений это происходит только в том случае, если оба фактора оказывают отрицательное воздействие, т.е. эксплуатационные и капитальные затраты увеличиваются.

«Запас прочности» проекта по отношению к стоимости товарной продукции не велик: при снижении ее на 12%, проект оказывается на грани окупаемости (рис. 5.3.3(б)). Льготирование по налогу на прибыль исправляет ситуацию и позволяет предприятию осуществлять эффективную деятельность вплоть до снижения стоимости годового выпуска товарной продукции на 18% (критическая точка), т.е. при цене на феррониобий около 1 тыс. руб./кг (~17\$/кг при действующем курсе доллара США).

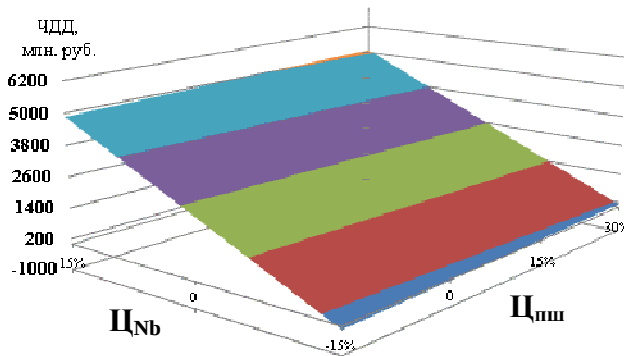
Совокупное влияние на ЧДД спроса на феррониобий и микроклиновый продукт (рис. 5.3.3(в)) мало отличается от влияния только спроса на феррониобий, т.к. доля полевошпатовых материалов в стоимости годового выпуска товарной продукции невелика.



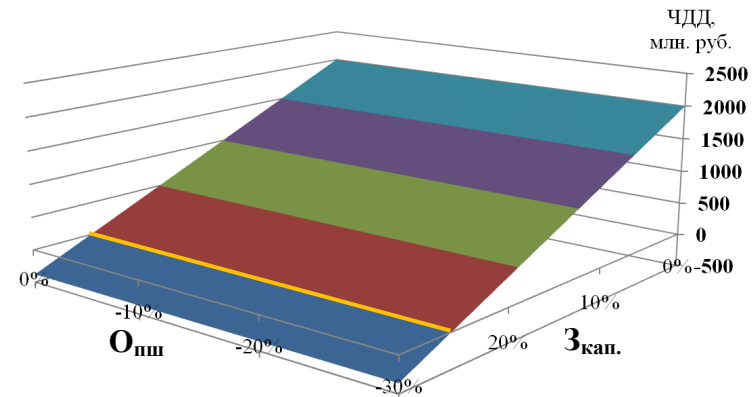
а) Совокупное влияние на ЧДД эксплуатационных и капитальных затрат



б) Совокупное влияние на ЧДД стоимости товарной продукции и налоговой политики государства



в) Совокупное влияние на ЧДД спроса на товарные продукты



г) Совокупное влияние на ЧДД капитальных затрат и объема производства микроклинового концентрата

Условные обозначения

■ Оптимальный диапазон изменения факторов, — Критическая граница

$Z_{\text{эксп.}}$ — эксплуатационные затраты, $Z_{\text{кап.}}$ — капитальные затраты, $H_{\text{пр}}$ — налог на прибыль, $C_{\text{тп}}$ — стоимость годового выпуска товарной продукции, $C_{\text{нб}}$ — цена ниобия, $C_{\text{мш}}$ — цена микроклинового концентрата, $O_{\text{пш}}$ — объем производства полевошпатовой продукции (микроклинового концентрата).

Рис. 5.3.3. Оценка «запаса прочности» инвестиционного проекта освоения Большетагнинского месторождения

Повышение спроса на микроклиновое концентрат на 30% (с 30 до 40 тыс. т) практически не оказывает влияния на ЧДД (увеличивается примерно на 5%). При этом необходимо отметить, что принятый в экономических расчетах объем производства микроклинового концентрата снижен в 10 раз относительно возможного в связи с отсутствием потребности. Поэтому при максимальных объемах производства данного продукта возможно достичь значительного повышения ЧДД.

Также рассмотрен вариант, иллюстрирующий степень влияния на ЧДД одновременного наступления наиболее вероятных отрицательных событий: реализация апатитового концентрата по себестоимости (~2000 руб./т), снижения объемов производства микроклинового концентрата вплоть до полного отказа и увеличения величины капитальных затрат (рис. 5.3.3(г)). Как видно из графика, даже при полном отказе от производства микроклинового концентрата и увеличении капитальных затрат на 20% проект остается эффективным.

Проведенный двухфакторный анализ по ключевым переменным показал, что проект характеризуется высоким «запасом прочности», а, значит, обладает достаточной гибкостью и способностью маневрировать при изменении различных факторов как внутренней, так и внешней среды.

5.3.3. Моделирование вариантов совместного освоения Большешагнинского месторождения ниобия с другими преимущественно редкометалльными сырьевыми объектами Зиминского рудного района

Зиминский рудный район в Иркутской области является важнейшим в России перспективным центром добычи и производства редкометалльной и сопутствующей ценной нерудной продукции [Гайкова, Назарьев, 2011].

Рудный район, который по объему запасов ниобия является крупнейшим в стране и одним из самых крупных в мире, а по качеству фосфорного сырья – не имеет аналогов на территории Сибири и Дальнего Востока, пока не освоен. В его пределах сосредоточены комплексные, от уникальных до мелких по запасам месторождения редких металлов и нерудных полезных ископаемых – Белозиминское, Большешагнинское и Среднезиминское (рис. 5.3.4), в целом подготовленные к промышленному освоению. Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ на указанных месторождениях, относимых к нераспределенному фонду недр, учитываются запасы ниобия, тантала, редкоземельных металлов, фосфора, микроклина и урана. В пределах рудного района также оценен ресурсный потенциал плавленого шпатового сырья и общераспространенных полезных ископаемых.

Белозиминское, Большешагнинское и Среднезиминское месторождения согласно требованиям ст. 2.1 Закона Российской Федерации «О недрах» относятся к участкам недр федерального значения. Месторождения Зиминского рудного района планомерно изучались начиная с

1952 г. в течение 40 лет силами ведущих иркутских геологических организаций Мингео СССР при участии ВИМСа; по Белозиминскому месторождению Гиредметом Минцветмета СССР был подготовлен проект разработки, действовала опытная фабрика.



Рис. 5.3.4. Расположение месторождений Зиминского рудного района

Большая работа по актуализации геолого-экономической оценки минерально-сырьевого потенциала рудного района выполнена в 1998-2000 гг. [Определение перспектив..., 2000ф; Эпштейн и др., 2000], в этот же период обобщены геологические данные по месторождениям района [Рябцев и др., 2006; Фролов, Белов, 1999; Эпштейн и др., 2000]. С 2005 г. по 2012 г. в рамках специализированных геологоразведочных работ за счет средств федерального бюджета проведено доизучение Белозиминского и Большетагнинского месторождений [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2007ф, 2012ф].

Уникальное по масштабам ниобиевого оруденения *Белозиминское месторождение* приурочено к массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов с развитой по ним остаточной корой выветривания (ОКВ) линейного типа. Запасы руд ОКВ утверждались ГКЗ СССР в 1962 г. (горизонты охр и сыпучек) и 1977 г. (горизонт охр); государственным балансом по кат. В и C_1 учитываются запасы Nb_2O_5 , P_2O_5 , а по кат. C_2 также Ta_2O_5 и ΣREE_2O_3 в качестве

попутных. В 1988 г. на государственный баланс поставлены значительные запасы редкометалльных руд кат. В, С₁ и С₂ в коренных породах месторождения. В настоящее время промышленными перспективами, подтвержденными современными исследованиями, обладают руды горизонта охр ОКВ. По коренным рудам и рудам горизонта сыпучек ОКВ требуется пересмотр принятых при подсчете запасов технологических решений с целью повышения технико-экономических показателей разработки.

По результатам переоценки руд горизонта охр ОКВ Белозиминского месторождения [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф] рекомендовано вести их разработку открытым способом с производительностью по добыче 2,8 млн. т в год (в пересчете на сухую массу) с применением широкого комплекса современных гидрозащитных мероприятий в связи с высокой обводненностью рудоносного горизонта. Для обогащения руд ФГУП «ВИМС» совместно с ОАО «Гиредмет» и ФГУП «ЦНИИчермет» предложена усовершенствованная магнитно-гравитационно-флотационная схема, позволяющая получить кондиционные пироксололумбитовый (ниобиевый с танталом), апатитовый (редкоземельно-фосфорный) и монацитовый (редкоземельный) концентраты. Из пироксололумбитового концентрата рекомендовано производство методом электропечной алюминотермической плавки феррониобия марки ФН658. При организации переработки апатитового концентрата товарной продукцией могут стать фосфорные удобрения (аммофос и пр.) и оксиды редкоземельных металлов преимущественно цериевой группы. Редкоземельные металлы той же группы также могут быть получены при переработке монацитового концентрата. При реализации рекомендованной технологии полностью обеспечиваются требования радиационной безопасности.

По результатам выполненной переоценки получены следующие интегральные показатели эффективности освоения руд горизонта охр ОКВ Белозиминского месторождения: чистый дисконтированный доход – 3935,3 млн. руб., индекс доходности – 1,23, срок возврата инвестиций – 11 лет, ВНД – 19,4%.

Руды крупного по масштабам ниобиевого оруденения *Большетагнинского месторождения* приурочены к силикатным метасоматитам одноименного карбонатитового комплекса и относятся к новому потенциально-промышленному типу. По результатам завершения оценочной стадии геологоразведочных работ на месторождении впервые выполнен подсчет запасов кат. С₁ и С₂ для основного полезного компонента – Nb₂O₅ и попутных компонентов и полезных ископаемых – P₂O₅, микроклина и U₃O₈ [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2012ф].

Технология переработки руд разработана ФГУП «ВИМС» при участии ОАО «Гиредмет», ООО «Радос», ООО «Evanko ltd.», ЗАО «Урал-Омега», ФГУП «ЦНИИчермет», ФГУП «ЦНИИгеолнеруд». Она включает предварительную крупнукусковую радиометрическую сепарацию, инновационную рудоподготовку и последующее магнитно-флотационное или гравита-

ционно-магнитно-флотационное обогащение (в зависимости от технологического типа руд), с производством пирохлорового (ниобиевого), апатитового (фосфорного) и микроклинового концентратов. Для передела пирохлорового концентрата выбрана сернокислотная технология получения пентаоксида ниобия (с попутным извлечением уранового химконцентрата), из которого методом внепечной алюминотермической плавки рекомендовано производство феррониобия марки ФНб60. Микроклиновый концентрат характеризуется уникальным K/Na-модулем ≥ 100 . Хвосты радиометрического обогащения пригодны для производства высококачественного щебня.

При технико-экономическом обосновании кондиций получены следующие интегральные показатели эффективности освоения месторождения при производительности горно-металлургического предприятия по добыче руды открытым способом 1 млн. т в год: чистый дисконтированный доход – 2244,9 млн. руб., индекс доходности – 1,27, срок возврата инвестиций – 10 лет, ВНД – 20,3%.

Среднее по масштабам редкометалльного оруденения *Среднезиминское месторождение* расположено на расстоянии около 10 км к юго-западу от Белозиминского и приурочено к одноименному массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. В пределах месторождения наибольшую ценность представляют гатчеттолитовые (уран-тантал-ниобиевые) руды в карбонатитах. Месторождение детально разведано, государственным балансом по кат. С₁ и С₂ в 1974 г. учтены запасы Ta₂O₅, Nb₂O₅, U₃O₈.

По неактуализированным сведениям из руд данного объекта возможно получение низкосортного коллективного концентрата и промпродукта с их последующей химико-металлургической переработкой и получением в качестве товарной продукции пентаоксидов тантала и ниобия (последний в силу высокой себестоимости в феррониобий не перерабатывается), а также уранового химконцентрата. Приемлемый показатель рентабельности освоения месторождения был достигнут при производительности по добыче руды открытым способом 330 тыс. т в год [Рябцев и др., 2006]. На месторождении требуется проведение работ по технологической и геолого-экономической переоценке.

Небольшое *Большетагнинское проявление плавикового шпата* расположено на расстоянии около 200 м к юго-востоку от одноименного ниобиевого месторождения в карбонатитах того же карбонатитового комплекса. По результатам проведенных поисково-оценочных работ на проявлении в 1964 г. подсчитаны в авторском варианте запасы и прогнозные ресурсы CaF₂ по кат. С₂ и Р₁. В рамках технологической переоценки проявления [Технологическая и геолого-экономическая переоценка..., 2007ф] разработаны принципиально новые решения по обогащению и переделу руд, позволяющие получать кондиционные флюоритовые концентраты металлургических сортов и криолит.

Выполненная укрупненная геолого-экономическая оценка эффективности освоения Большетагинского проявления флюорита (с приведением авторских запасов и ресурсов к условным запасам кат. С₁) показала следующие результаты при производительности по добыче руды открытым способом 300 тыс. т в год: рентабельность к общим инвестициям – 17,3%, окупаемость инвестиций – 3,7 года, ВНД – 18,3%.

На основе применения новых технологических и технико-экономических решений и с учетом существующей и прогнозной конъюнктуры рынков основной товарной продукции, которая может быть получена при разработке месторождений Зиминского рудного района, – феррониобия стандартного (металлургического) сорта, стандартного апатитового и высококалийевого микроклинового концентратов – моделируются четыре основных варианта освоения минерально-сырьевой базы данного рудного района [Темнов, Пикалова, 2013].

Сценарий 1 – «Сценарий сегодняшнего дня» – может быть рекомендован исходя из современной ситуации на внутреннем рынке минерального сырья и оправдан в случае сохранения в среднесрочной перспективе текущего уровня годового потребления феррониобия в России – 2,8-3 тыс. т (здесь и далее – в пересчете на Nb), а также при отсутствии предпосылок для его экспортных поставок. Сценарием предполагается, что агропромышленным комплексом регионов Сибири и Дальнего Востока в целом не востребованы фосфорные удобрения (в настоящее время потребляется порядка 30 тыс. т в год в пересчете на P₂O₅). Объемы производства высококалийевого микроклинового концентрата ограничены текущей внутрироссийской потребностью в нем (не более 20-30 тыс. т в год) отечественных электрокерамических, фарфорофаянсовых и других производств.

Сценарий 2 – «Сценарий растущего потребления» – предполагает наличие стабильного роста потребности отечественного металлургического комплекса в феррониобии, которая к 2020 г., согласно утвержденной приказом Минпромторга России от 18.03.2009 г. № 150 «Стратегии развития металлургической промышленности на период до 2020 года», может составить 5-6 тыс. т. Сценарием предполагается, что к 2020 г. должен быть достигнут значительный рост использования фосфорных удобрений агропромышленным комплексом регионов Сибири и Дальнего Востока до научно-обоснованных показателей их потребления (от 250 до 1100 тыс. т в пересчете на P₂O₅ по различным оценкам). Объем потребления микроклинового концентрата принят аналогично сценарию 1.

Сценарий 3 – «Сценарий экспортных возможностей» – рассчитан исходя из аналогичных сценарию 2 объемов потребления на внутреннем рынке апатитового и микроклинового концентратов при расширении потенциала реализации феррониобия за счет экспорта.

Сценарий 4 – «Сценарий неограниченного спроса» – предполагает максимально благоприятную для будущего горно-металлургического комбината конъюнктуру всех рынков планируемой к производству товарной продукции.

Далее приводятся посценарные решения реализации в ближне- и среднесрочной перспективе минерально-сырьевого потенциала Зиминского рудного района, предусматривающие создание горно-металлургического комбината по освоению от двух до четырех месторождений района. В сценариях не рассмотрен потенциал руд горизонта сыпучек ОКВ и коренных руд Белозиминского месторождения. Сценарии также не учитывают перспектив развития альтернативных реализуемых или планируемых к реализации горных проектов по производству редких металлов и высококалийевого микроклинового концентрата на территории Российской Федерации, и апатитового концентрата – на территории Сибири и Дальнего Востока.

Сценарий 1. В качестве единственного рекомендуемого к разработке месторождения в пределах рудного района принимается ниобиевое Большетагнинское, учитывая практически монокомпонентный (по доле в стоимости товарной продукции) состав руд данного объекта и возможность организации производства феррониобия в объеме, соответствующем текущей потребности внутреннего рынка. Кроме того производятся апатитовый, микроклиновый и урановый концентраты. В рамках сценария представляется целесообразным подготовка к освоению и вовлечение в эксплуатацию близрасположенного Большетагнинского проявления флюорита (рис. 5.3.5). Для обеспечения деятельности горно-металлургического комбината возводится внешняя инфраструктура, включающая автомобильную дорогу и линию электропередачи.

При реализации данного сценария (табл. 5.3.1) рентабельность к производственным фондам будущего горно-металлургического предприятия составит около 18%, в регионе будет создано ~950 новых рабочих мест, бюджетная эффективность составит около 900 млн. руб. ежегодно.

Сценарий 2. В рамках сценария в качестве базового рекомендуется Белозиминское месторождение, другие месторождения рудного района рассматриваются как резервные (рис. 5.3.5). Для обеспечения деятельности горно-металлургического комбината потребуется возведение железнодорожной ветки от ст. Тулун, необходимой для перевозки значительного объема нерудной товарной продукции, и объектов энергообеспечения (то же – в сценариях 3 и 4). Продукция комбината на первом этапе будет представлена феррониобием, апатитовым и монацитовым концентратами (табл. 5.3.1).

Таблица 5.3.1

Результирующие технико-экономические показатели сценариев освоения месторождений Зиминского рудного района

Показатель	Ед. изм.	Сценарий				
		1	2		3	4 ¹
			1 этап	2 этап		
Суммарная мощность по добыче руд (в пересчете на сухую массу)*	тыс. т	1 000	2 782	1 000	4 000	7 000
Годовой выпуск товарной продукции ² :						
– ниобий в феррониобии стандартного сорта (ФН658 и ФН660)	т	3 390	5 172	3 390	8 562	15 145
– апатитовый концентрат (36-39% P ₂ O ₅)	тыс. т	43	626	43	670	1 100
– микроклиновое концентрат (K/Na≥100)	тыс. т	30	–	30	30	308
– сумма оксидов редкоземельных металлов в монацитовом концентрате (40% ΣREE ₂ O ₃)	т	–	5 980	–	5 980	9 672
– оксид урана в урановом химконцентрате (75,6% U ₃ O ₈)	т	15	–	15	15	48
– товарный пентаоксид ниобия (99,7% Nb ₂ O ₅)	т	–	–	–	–	214
– товарный пентаоксид тантала (98% Ta ₂ O ₅)	т	–	–	–	–	34
– флюоритовый концентрат (92,1% CaF ₂)	тыс. т	–	–	35	35	35
– криолит (99% CaF ₂)	тыс. т	–	–	25	25	25
Годовая стоимость товарной продукции ²	млн руб.	4 627	8 628	5 955	14 584	26 162
Годовой доход горно-металлургического комбината ²	млн руб.	2 188	4 130	3 110	6 805	13 080
Суммарные инвестиции	млн руб.	9 560	24 377		25 893	40 511
Количество рабочих мест	чел.	950	1 700		2 700	4 200
Бюджетная эффективность (год)	млн руб.	898	1 985	1 176	3 044	5 070
Рентабельность к производственным фондам	%	18,4	22,9	33,8	27,9	30,4

¹ максимальный вариант, без переработки апатитового и монацитового концентратов;² максимальный годовой показатель

К моменту завершения разработки руд горизонта охр ОКВ Белозиминского месторождения на втором этапе рекомендуется ввод в эксплуатацию Большетагнинского месторождения ниобия и одноименного проявления (после завершения ГРР – месторождения) флюорита (см. табл. 5.3.1). Переработка руд Большетагнинского ниобиевого и флюоритового месторождений будет осуществляться на мощностях, высвобождающихся после окончания отработки охр ОКВ Белозиминского месторождения.

Рентабельность освоения месторождений рудного района, составляющая на первом этапе 23%, на втором этапе повышается до 34%. При этом в регионе может быть создано ~1,7 тыс. новых рабочих мест, бюджетная эффективность составит до 2 млрд. руб. ежегодно (см. табл. 5.3.1).

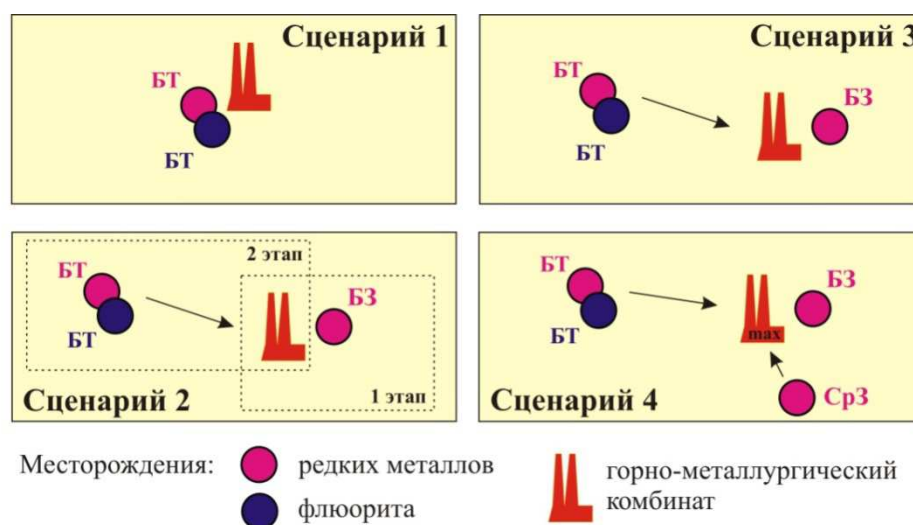


Рис. 5.3.5. Сценарии совместного освоения месторождений Зиминского рудного района в Иркутской области
(Сокращения: БТ – Большетагнинское, БЗ – Белозиминское, СрЗ – Среднезиминское)

Сценарий 3. При реализации данного сценария освоение рудного района рекомендуется начать с разработки Большетагнинского месторождения ниобия с отсроченным на 5-7 лет последующим вовлечением в эксплуатацию Белозиминского месторождения (охр ОКВ) и месторождения флюорита (см. рис. 5.3.5). Товарной продукцией единого горно-металлургического комбината будет являться феррониобий, апатитовый, микроклинов, монацитовый, урановый, флюоритовый концентраты, криолит (см. табл. 5.3.1).

Освоение месторождений по данному сценарию приведет к появлению в регионе ~2,7 тыс. новых рабочих мест. Рентабельность к производственным фондам составит около 28%. Бюджетная эффективность в целом – около 3 млрд. руб. ежегодно (см. табл. 5.3.1).

Сценарий 4. С целью оценки совокупного потенциала Зиминского рудного района осуществлен расчет основных показателей освоения всех рассматриваемых объектов – Большетагнинского (ниобий, фосфор, микроклин, уран), Белозиминского (ниобий, фосфор, редкоземельные металлы,

тантал), Большетагнинского (флюорит), а также не учитывавшегося в предыдущих сценариях Среднезиминского (тантал, ниобий, уран) (см. рис. 5.3.5).

Сценарий характеризуется максимально возможными, вне зависимости от спроса на товарную продукцию и исходя только из горнотехнических условий, мощностями по добыче руд рассматриваемых месторождений и получением широкой номенклатуры товарной продукции: феррониобия, апатитового, микроклинового, монацитового, уранового и флюоритового концентратов, пентаоксидов ниобия и тантала, криолита (см. табл. 5.3.1).

Освоение месторождений единым горно-металлургическим комбинатом по данному сценарию приведет к появлению в регионе ~4,2 тыс. новых рабочих мест. Рентабельность к производственным фондам составит около 30%, бюджетная эффективность в целом – около 5 млрд. руб. ежегодно.

На базе единого горно-металлургического комбината возможна организация переработки апатитового концентрата на фосфатные удобрения с извлечением оксидов редкоземельных металлов и монацитового концентрата также с получением оксидов редкоземельных металлов. В этом случае возможно значительное увеличение стоимости годового выпуска товарной продукции, при этом доля в ней суммарно полученных оксидов редкоземельных металлов возрастет с 6 до 22% (рис. 5.3.6).

Таким образом, могут быть даны следующие рекомендации к освоению комплексных существенно редкометалльных месторождений Зиминского рудного района.

1. При незначительном потенциале роста российского рынка феррониобия и отсутствии экспортных возможностей его реализации наиболее оправданно вовлечение в отработку только Большетагнинского месторождения ниобия с производством порядка 3 тыс. т феррониобия ежегодно, а также сравнительно небольших объемов апатитового, микроклинового и уранового концентратов. Параллельная разработка флюоритового месторождения позволит дополнительно производить флюоритовый концентрат и криолит с использованием действующих мощностей ниобиевого производства.

2. Ожидание существенного увеличения потребности металлургических предприятий России в феррониобии, а агропромышленных предприятий регионов Сибири и Дальнего Востока – в фосфатных удобрениях предопределяет последовательное освоение Белозиминского и Большетагнинского месторождений горно-металлургическим комбинатом с производством на первом этапе порядка 5 тыс. т феррониобия и более 600 тыс. т апатитового концентрата ежегодно.

3. Наличие возможностей поставок феррониобия на мировой рынок диктует целесообразность параллельного освоения Белозиминского и Большетагнинского месторождений единым горно-металлургическим предприятием. При реализации данной стратегии для внутреннего и внешнего рынков может ежегодно производиться более 8,5 тыс. т феррониобия. Апатито-

вый концентрат на внешний рынок не поставляется. Эффект от создания единой производственной инфраструктуры проявляется уже в первые годы освоения, а рентабельность проекта в целом достигает 28%.

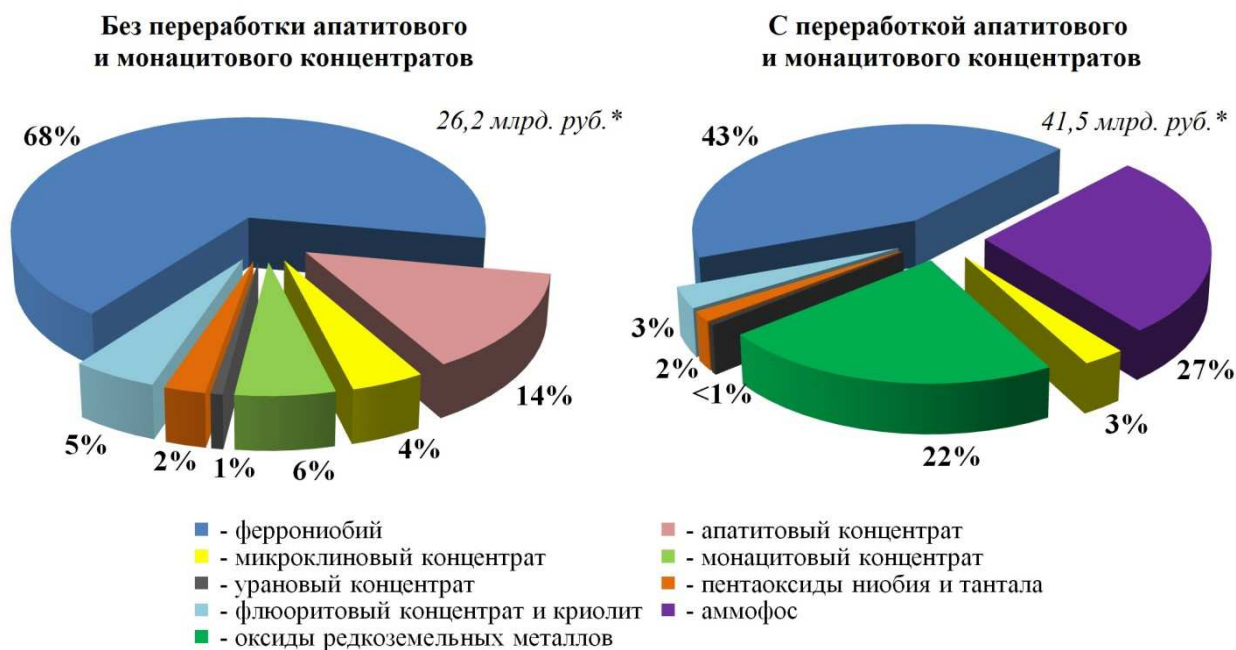


Рис. 5.3.6. Сравнение структуры стоимости товарной продукции, получаемой по сценарию 4, в зависимости от наличия переработки апатитового концентрата
(* стоимость годового выпуска товарной продукции)

4. Совокупный минерально-сырьевой потенциал Зиминского рудного района реализуется при наличии максимально благоприятных условий по сбыту товарной продукции, получаемой при разработке входящих в его состав месторождений. Горно-металлургическим комбинатом, ведущим разработку четырех месторождений рудного района, в год может производиться более 15 тыс. т ферронниобия, 1 млн. т высококачественного апатитового концентрата, 300 тыс. т высококалийного микроклинового концентрата и другой ценной продукции. При организации переработки апатитового и монацитового концентратов на рынок может быть поставлено более 16 тыс. т оксидов редкоземельных металлов и 350 тыс. т фосфатных удобрений (в пересчете на P_2O_5).

Необходимо подчеркнуть, что наибольший вклад в ВВП страны от реализации проектов освоения месторождений Зиминского рудного района достигается при условии потребления получаемой горно-металлургическим комбинатом товарной продукции российскими предприятиями. В этом случае в экономику страны (при реализации максимального сценария) будет поступать ежегодно не только порядка 5,1 млрд. руб. налогов, но и значительный объем ценнейшей сырьевой продукции на сумму около 0,5 млрд. долл. США.

Существенный дополнительный экономический эффект достигается при организации переработки апатитового концентрата на месте. Эффективность деятельности единого горно-металлургического комбината также может быть повышена за счет учета стоимости нерудной товарной продукции (например, использование вскрышных пород и хвостов радиометрического обогащения руд Большетагнинского месторождения для производства щебня и др.). В этом случае годовая стоимость товарной продукции будет увеличена на 3-10%.

Глубина переработки руд рассматриваемых месторождений играет важную роль в организации эффективного производства. Рост инвестиционных затрат при строительстве производств по химико-металлургическому переделу концентратов, получаемых при разработке и обогащении руд месторождений Зиминского рудного района, нивелируется значительным увеличением стоимости конечной товарной продукции. Организация перерабатывающих производств на месте исключает перевозку опасных, в том числе радиоактивных, грузов на дальние расстояния и значительно снижает стоимость транспортировки. Эффективность проекта, как коммерческая, так и бюджетная, при увеличении глубины и комплексности переработки повышается.

Создание такого крупного производства в малоосвоенном районе сопряжено с большой долей капитальных затрат, связанных со строительством внешней инфраструктуры. В предлагаемых сценариях ее доля в суммарных инвестициях составляет от 30 до 50% (железнодорожная ветка от ст. Тулун – 9 млрд. руб., ЛЭП – 2,3 млрд. руб., автомобильная дорога – 1,5 млрд. руб.). При этом получение высоких интегральных показателей эффективности достигается за счет отсутствия заемного капитала (в расчетах принято использование собственных средств) и сложившейся на момент проведенной оценки благоприятной конъюнктуры рынка.

Однако учитывая масштаб производства и, следовательно, величины инвестиций, а также специфику практически монопольного мирового рынка ниобия, вероятность достижения рассчитанных экономических показателей снижается. В связи с этим реализация предложенных сценариев во многом будет зависеть от государственного участия в организации крупного промышленного производства на базе месторождений Зиминского рудного района. Такое участие может быть как соинвестиционно-стимулирующего (государственно-частное партнерство при строительстве капиталоемких объектов внешней инфраструктуры, установление налоговых льгот и преференций), так и организационного характера (привлечение к освоению месторождений и координация разноотраслевых участников, обеспечение спроса на продукцию глубокого передела, поддержка на внешних рынках) [Алпатов, Щербинина, 2009; Варнавский, 2005].

В целом разработка, выбор и реализация стратегии освоения крупного потенциального центра добычи и производства редкометалльной и широкой номенклатуры сопутствующей товарной продукции на базе месторождений Зиминского рудного района должна позволить

улучшить все показатели эффективности их разработки, снизить основные риски и установить наиболее приемлемый баланс интересов государства и будущих недропользователей.

В результате, путем всестороннего экономического анализа обоснована промышленная значимость Большетагнинского месторождения ниобия. Объект является перспективным как с точки зрения государства, так и потенциального недропользователя. С одной стороны, ввод объекта в эксплуатацию позволит, в первую очередь, реализовать задачи импортозамещения ниобиевой продукции в России и развития отечественной промышленности редких металлов; во вторую очередь, пополнить бюджеты различных уровней, развить инфраструктуру регионе и организовать в нем новые рабочие места. С другой стороны, реализация проекта промышленного освоения месторождения характеризуется высокой экономической эффективностью и гибкостью, а, значит, является привлекательной для потенциального инвестора.

Таким образом обосновано третье научное положение диссертации **«Геолого-экономическая оценка нового типа ниобиевых руд, выполненная на основе разработанной экономической модели месторождения и включающая оценку экономической эффективности сценариев освоения Большетагнинского месторождения и Зиминского рудного узла в целом на базе единого горно-металлургического комплекса, с учетом различных рыночных ситуаций позволяет утверждать о его промышленной значимости».**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Сравнительный анализ особенностей геологического строения и качества руд отечественных месторождений ниобия основных геолого-промышленных типов по сравнению с зарубежными позволил выделить среди них наиболее перспективные. Одним из таких объектов является Большетагнинское месторождение ниобия с рудами нового потенциально-промышленного типа – в силикатных метасоматитах карбонатитовых комплексов, где основным полезным компонентом является ниобий, а попутными – микроклин, апатит и уран. Относительно простое геологическое строение, богатые монометалльные руды, простые горно-технические и гидрогеологические условия характеризуют месторождение с благоприятной стороны. В тоже время высокая технологическая изменчивость руд и тонкая вкрапленность пироклора предопределяет необходимость поиска нестандартных технологических решений.

2. Доказана возможность промышленного освоения сырьевых объектов с новым нетрадиционным типом руд (Большетагнинское месторождения ниобия) на основе применения инновационных способов их переработки и осуществлении обоснованного выбора различных проектных решений (технических, технологических, инфраструктурных). Установлено, что на современном этапе развития техники и технологии в сложившихся рыночных условиях для эффективного освоения Большетагнинского месторождения при производительности по добыче 1 млн. т в год оптимальная технология переработки руд должна включать: крупнопорционную сортировку исходной горнорудной массы с разделением ее на технологические типы, крупнокусовое обогащение каждого сорта руд рентгенорадиометрическим методом, инновационный способ рудоподготовки (дробление в дробилке активного удара EVANKO и сухое измельчение в центробежно-ударных мельницах), глубокое обогащение по флотационно-магнитной схеме, сульфатизацию пироклорового концентрата с получением пентаоксида ниобия и его выпечная алюминотермическую плавку на феррониобий высокого качества.

3. В результате выполненной геолого-экономической оценки Большетагнинского месторождения ниобия с учетом результатов применения комплекса современных методов переработки руд и принятия обоснованных проектных решений доказана инвестиционная привлекательность данного объекта. Проведенный комплекс исследований (минералогических, технологических, маркетинговых и др.) позволил включить данный объект в один ряд с уже известными и перспективными для освоения месторождениями ниобия.

4. Доказана промышленная ценность Большетагнинского месторождения при применении новых подходов к технологии переработки руд нетрадиционного типа. Показано, что освоение месторождения даже при небольшой производительности, ориентированной на существующий внутренний спрос на ниобий, характеризуется приемлемой коммерческой и бюджетной эффективностью. На основе геолого-экономического моделирования обоснован высокий «запас прочности» проекта, позволяющий нивелировать различные риски, связанные с реализацией проекта.

5. Разработаны рекомендации по реализации минерально-сырьевого потенциала Зиминского рудного района (Иркутская область). В основе модели освоения месторождений района лежат несколько основных сценариев, увязанных с различными рыночными прогнозами, предполагающих создание крупного горно-металлургического предприятия, обеспечивающего глубокую переработку минерального сырья. Показана возможность эффективного производства всего спектра товарной продукции, как основной так и попутной, необходимой для сырьевого обеспечения высокотехнологичных отраслей промышленности страны и агропромышленного комплекса регионов Сибири и Дальнего Востока. Отмечена необходимость государственного участия в организации крупного промышленного производства на базе месторождений Зиминского рудного района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная

1. Авдонин, В.В. Принципы геолого-промышленной типизации рудных месторождений. Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений ТПИ. Обзор / В.В. Авдонин. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 40 с.
2. Авдохин, В.М. Технологическо-экономический метод оптимизации глубины обогащения труднообогатимых руд / В.М. Авдохин, И.М. Петров // Горный журнал. – 2009. – № 1. – С. 71-74.
3. Алпатов Г.Е. Институт кластера и частно-государственное партнерство / Г.Е. Алпатов, А.О. Щербинина // Актуальные проблемы менеджмента в России на современном этапе: проблемы внедрения управленческих инноваций в макроэкономических системах. Материалы всероссийской научно-практической конференции. – СПб: ОЦЭиМ, 2009. – С. 66-67.
4. Апельцин, Ф.З. Геология месторождений редких элементов. Вып. 2. Колумбитоносные граниты / Ф.З. Апельцин, Л.Г. Фельдман. – М.: ВИМС, Госгеолтехиздат, 1958. – 52 с.
5. Архангельская, В.В. Руды редкоземельных металлов России. Минеральное сырье, № 19. Серия геолого-экономическая / В.В. Архангельская, Н.Н. Лагонский, Т.Ю. Усова, Л.Б. Чистов – М.: ВИМС, 2006. – 72 с.
6. Бацуев, А.А. Промышленные испытания и внедрение химико-металлургической переработки ниобиевых промпродуктов / А.А. Бацуев, В.А. Хомутников, О.П. Иванов // Цветные металлы. – 1978. – № 10. – С. 74-76.
7. Беневольский, Б.И. Принципы, методы и порядок оценки прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых / Б.И. Беневольский, Е.М. Аксенов, Е.В. Блинова и др.; под ред. А.И. Кривцова. – М.: ЦНИГРИ, 2010. – 95 с.
8. Бортников, Н.С. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны / Н.С. Бортников, К.В. Лобанов, А.В. Волков, А.Л. Галямов, И.В. Викентьев и др. // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. № 6. – 479 с.
9. Быховский, Л.З. Большетагинское месторождение ниобия – объект первоочередного освоения в России / Л.З. Быховский, А.В. Темнов, Л.П. Тигунов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2002. – № 10. – С. 2-9.
10. Быховский, Л.З. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, № 28 / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин. – М.: Изд-во ВИМС, 2009. – 157 с.
11. Быховский, Л.З. Геолого-экономическая оценка ниобиевого оруденения Зиминского рудного района с учетом новых геолого-технологических данных / Л.З. Быховский, Е.А. Калиш, В.Е. Лифиренко и др. // Руды и металлы. – 2000. – № 6. – С. 20-28.

12. Быховский, Л.З. Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности / Л.З. Быховский, Е.И. Котельников, Е.Г. Лихникевич, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 9. – С. 20-25.
13. Быховский, Л.З. Комплексная оценка месторождений – основа рационального использования минерально-сырьевых ресурсов / Л.З. Быховский, В.И. Воропаев // Минеральные ресурсы России. – 2004. – № 2. – С. 16-20.
14. Быховский, Л.З. Минерально-сырьевая база редких металлов Северо-Запада России – основа создания центра редкометалльной промышленности страны / Л.З. Быховский, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 1. С. 3-7.
15. Быховский, Л.З. Промышленные типы месторождений редких металлов. Геологические методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Обзор / Л.З. Быховский, В.С. Кудрин. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 62 с.
16. Быховский, Л.З. Рациональное использование недр: проблемы и пути решения / Л.З. Быховский, Г.А. Машковцев, Б.Г. Самсонов, Е.М. Эпштейн // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Обзор. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. – 42 с.
17. Важнейшие промышленные типы россыпей и месторождений кор выветривания, технология оценки и освоения. XI Международное совещание по геологии россыпей и кор выветривания. Тезисы докладов. РАН, МПР. – М., 1997. – 273 с.
18. Ван-Ван-Е, А.П. Научные принципы моделирования основных этапов освоения георесурсов минерально-сырьевых центров / А.П. Ван-Ван-Е // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 4. – С. 22-24.
19. Варнавский В.Г. Партнерство государства и частного сектора: формы, проекты, риски / В.Г. Варнавский. – М.: Наука, 2005. – 315 с.
20. Гайкова, О.Ю. Перспективы создания новых горнорудных районов в Иркутской области, проблемы и пути их решения / О.Ю. Гайкова, В.А. Назарьев // Труды научно-практической конференции «Создание новых горнорудных районов в Сибири и на Дальнем Востоке: проблемы и пути решения». – М., 2011. – С. 52-59.
21. Гармазов, Ю.Л. Автоклавный способ переработки низкосортных танталониобиевых минеральных концентратов. Сборник трудов IV научной конференции (22-24 ноября 2001 г.). Развитие редкометалльной промышленности в России на базе апатита / Ю.Л. Гармазов, В.П. Черных, И.Ю. Гармазов. – СПб., 2001. – С. 78-81.
22. Гинзбург, А.И. Генетические типы месторождений редких элементов / А.И. Гинзбург // Разведка и охрана недр. – 1957. – № 6. – С. 1-12.

23. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования выбора варианта систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
24. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 № 2395-1 (ред. от 13.07.2015, с изм. и доп. в ред. Федерального закона от 29.06.2015 № 205-ФЗ). / Собрание законодательства РФ. 1995. № 10. Ст. 823; Российская газета. 1995. № 52: первоначальный текст.
25. Зеликман, А.Н. Ниобий и тантал / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов, А.В. Елютин, А.М. Захаров. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
26. Иванков, С.И. Переработка комплексных редкометалльных руд Большетагнинского месторождения на основе малоотходной комбинированной обогатительно-металлургической технологии / С.И. Иванков, Н.В. Петрова, Е.И. Любимова и др. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – М.: ВИНТИ, 2002. – Выпуск 10. – С. 45-74.
27. Канторович, Л.В. Оптимальные решения в экономике / Л.В. Канторович, А.Б. Горстко. – М.: Наука, 1972. – 232 с.
28. Канторович, Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов / Л.В. Канторович. – М.: АН СССР, 1960. – 347 с.
29. Клейнер, Г.Б. Экономико-математическое моделирование и экономическая теория / Г.Б. Клейнер // Экономика и математические методы. – 2001. – Т. 37. – С. 111–126.
30. Козловский, Е.А. Россия: минерально-сырьевая политика и национальная безопасность / Е.А. Козловский. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 848 с.
31. Козловский, Е.А. Бразилия, Россия, Индия, Китай, ЮАР: стратегия недропользования / Е.А. Козловский, Е.А. Комаров, Р.Н. Макрушин. – М., 2013. – 430 с.
32. Кременецкий, А.А. Геолого-промышленная типизация редкометалльных месторождений / А.А. Кременецкий, Ю.А. Багдасаров, С.М. Бескин и др. // Разведка и охрана недр. – 1998. – № 3. – С. 37-41.
33. Крохин, В.А. Исследование процесса очистки пироксеновых концентратов от фосфора солянокислотной обработкой / В.А. Крохин, В.Н. Заиканов, Л.Б. Чистов // Сборник научных трудов. Московский институт стали и сплавов. – 1979. – № 117. – С. 52-55.
34. Кудрин, В.С. Минеральное сырье. Ниобий и тантал. / В.С. Кудрин, Ю.С. Кушпаренко, Н.В. Петрова и др. // Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 82 с.
35. Кузькин, В.И. Особенности экологической, инженерно-геологической и гидрогеологической прогнозной оценки условий эксплуатации рудных месторождений / В.И. Кузькин // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 2. – С. 56-59.
36. Курков, А.В. Современное состояние и основные направления развития процессов глубокой и комплексной переработки редкометаллического сырья / А.В. Курков, В.М. Котова // Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 72-77.

37. Кусевич, В.И. К вопросу глубокой переработки минерального сырья / В.И. Кусевич, С.А. Данильянц, В.Л. Заверткин, В.А. Алискеров // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 6. – С. 37-40.
38. Кушпаренко, Ю.С. Технология переработки редкометалльных руд. Лабораторные и технологические исследования минерального сырья. Обзорная информация / Ю.С. Кушпаренко, Н.В. Петрова. – М.: АО «Геоинформмарк», 1994. – 46 с.
39. Лапин, А.В. Месторождения кор выветривания карбонатитов / А.В. Лапин, А.В. Толстов. – М.: Наука, 1995. – 208 с.
40. Лапин, А.В. Уникальные Nb-TR-Sc руды Томторского месторождения и их генезис / А.В. Лапин // Материалы конференции «Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования», 25-27 ноября 2015 г., Москва. – М.: ИГЕМ РАН, 2015. – С. 70-71.
41. Лихникевич, Е.Г. Гидрометаллургические технологии извлечения редких и редкоземельных элементов из редкометалльных месторождений Сибири / Е.Г. Лихникевич, Н.В. Петрова, А.А. Рогожин, С.И. Ануфриева, Ю.И. Лебедева // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2013): материалы Международного совещания (16-19 сентября 2013 г.). Под общ. ред. академика РАН В.А. Чантурии; отв. редактор Т.В. Чекушина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 314-316.
42. Лихникевич, Е.Г. Комплексная переработка ниобий-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом / Е.Г. Лихникевич, Н.В. Петрова, Н.С. Михайлова и др. // Разведка и охрана недр. – 1999. – № 1. – С. 42-43.
43. Лихникевич, Е.Г. Минералогические аспекты сульфатизации пироклоровых концентратов с повышенным содержанием силикатных и алюмосиликатных фаз / Е.Г. Лихникевич, Ю.И. Лебедева, С.И. Ануфриева // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 11. – С. 42-46.
44. Ломаев, В.Г. Чуктуконское месторождение ниобий-редкоземельных руд – приоритетный объект для модернизации редкометалльной промышленности России / В.Г. Ломаев, С.С. Сердюк // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2011. – № 4. – С. 132-154.
45. Лякишев, Н.П. Легирующие сплавы и стали с ниобием / Н.П. Лякишев, Н.А. Тулин, Ю.Л. Плинер. – М.: «Металлургия», 1981. – 190 с.
46. Машковцев, Г.А. Минерально-сырьевой потенциал металлургии России / Г.А. Машковцев, В.В. Коротков, И.Г. Печенкин, В.Т. Покалов, А.А. Рогожин // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 9. – С. 63-68.

47. Машковцев, Г.А. Перспективы рационального освоения комплексных тантал-ниобий-редкоземельных месторождений России / Г.А. Машковцев, Л.З. Быховский, А.А. Рогожин, А.В. Темнов // Разведка и охрана недр. – М., 2011. – № 7. – С. 9-13.
48. Мелентьев, Г.Б. Концепция восстановления и развития производств редких металлов в России / Г.Б. Мелентьев // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. – 2011. – № 4. – С. 104-113.
49. Мендель, А.В. Модели принятия решений: учеб. пособие / А.В. Мендель. – М.: ЮНИТИ–ДАНА, 2012. – 463 с.
50. Меркулов М.В. Оптимизации технических решений на основе экономико-математического моделирования / М.В. Меркулов, В.А. Косьянов // В мире научных открытий. – 2010. – №2-3. – С. 26-28.
51. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (Вторая редакция, исправленная и дополненная), утвержденные Минэкономики РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ № ВК 477 от 21 июня 1999 г. – 421 с.
52. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – М.: Мин. фин., 2000. – 197 с.
53. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. Утв. распоряж. МПР РФ № 37-р от 05.06.2007 г. – М., ГКЗ, 2007. – 43 с.
54. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). Утв. Распоряжением МПР России от 05 июня 2007 г. №37-р. – М.: НП НАЭН, 2008. – 49 с.
55. Мировой минерально-сырьевой комплекс. Ниобий. Тантал. Цирконий. Редкоземельные элементы / Под ред. И.В. Егоровой, А.М. Лаптевой, Б.К. Михайлова, А.П. Ставского. – М.: ИАЦ «Минерал», 2009. – С. 7-48.
56. Ниобий: вслед за инновациями / Владимир Путивцев // Металлы Евразии. – 2011. – № 3. – С. 60-62.
57. Новожилов, В.В. Проблема измерения затрат и результатов при оптимальном планировании / В.В. Новожилов. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
58. Орлов, А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.
59. Орлова, Т.Т. Оптимизация производственных и социально-экономических процессов в регионе / Т.Т. Орлова. – Иркутск: ИрГУПС, 2009. – 156 с.
60. Петров, А.А. Экономика. Модели. Вычислительный эксперимент / А.А. Петров. – М.: Наука, 1996. – 254 с.

61. Пожарицкая, Л.К. Большетагнинское месторождение ниобия. В кн. «Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956-2006)». Минеральное сырье, № 18 / Л.К. Пожарицкая, Б.Т. Вейс, Т.В. Квитко, Г.Н. Нечелюстов, Е.А. Чернышева – М.: ВИМС, 2006. – С. 119-134.
62. Пожарицкая, Л.К. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири / Л.К. Пожарицкая, В.С. Самойлов. – М.: Наука, 1972. – 267 с.
63. Попов, А.М. Экономико-математические методы и модели. Учебник / А.М. Попов, В.Н. Сотников. – М.: Юрайт, 2013. – 479 с.
64. Потанин, С.Д. Ниобий / С.Д. Потанин // Разведка и охрана недр. – 2001. – № 11-12. – С. 40-43.
65. Потанин, С.Д. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы ниобия России. В кн. «Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956-2006 гг.)». Минеральное сырье, № 18 / С.Д. Потанин, Е.А. Калиш, В.К. Рябкин. – М.: ВИМС, 2006. – С. 26-39.
66. Редкие металлы на мировом рынке: В 2 т. Том 1. Металлы, имеющие собственные месторождения / Отв. ред. Усова Т.Ю.; МПР РФ, РАН, ИМГРЭ. – М., 2008. – 197 с.
67. Россман, Г.И. Промышленная радиационная экология минерального сырья. Минеральное сырье, № 25 / Г.И. Россман, А.Е. Бахур, Н.В. Петрова. – М.: ВИМС, 2012. – 318 с.
68. Рябкин, В.К. Об эффективности крупнопорционной сортировки ниобиевых, редкоземельных и других руд / В.К. Рябкин, В.Б. Ратнер, Е.М. Эпштейн // Минеральное сырье, № 7. – М.: ВИМС, 2000. – С. 160-164.
69. Рябцев В.В. Танталовые руды России. / В.В. Рябцев, Л.Б. Чистов, Т.Н. Шурига // Минеральное сырье, № 21. Серия геолого-экономическая – М.: ВИМС, 2006. – С. 58-59.
70. Савицкая, Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия / Г.В. Савицкая. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-М, 2009. – 536 с.
71. Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке. Тезисы докл. Междунар. симп., 5-9 октября 1998 г., Москва. – М.: ВИМС, 1998. – 384 с.
72. Стулов, П.Е. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобийсодержащих сплавов из концентратов руд Большетагнинского месторождения / П.Е. Стулов, А.Н. Серегин, В.С. Пикалова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – М.: ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2012. – № 4. – С. 5-11.
73. Темнов, А.В. Сценарии реализации минерально-сырьевого потенциала комплексных редкометалльных месторождений Зиминского рудного района / А.В. Темнов, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. – 2013. – №7. – С. 54-60.

74. Труды Международной конференции «Минерально-сырьевая база черных, легирующих и цветных металлов России и стран СНГ: проблемы и пути развития». – М.: ВИМС, 2008. – 288 с.

75. Фролов, А.А. Карбонатитовые месторождения России / А.А. Фролов, А.В. Толстов, С.В. Белов. – М.: НИИ-Природа, 2003. – 494 с.

76. Фролов, А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогенез, прогноз) / А.А. Фролов, А.В. Лапин, А.В. Толстов и др. – М.: НИИ-Природа, 2005. – 540 с.

77. Фролов, А.А. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) / А.А. Фролов, С.В. Белов // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 2. – С. 109-130.

78. Эпштейн, Е.М. Геолого-петрологическая модель и генетические особенности рудоносных карбонатитовых комплексов / Е.М. Эпштейн. – М.: Недра, 1994. – 256 с.

79. Эпштейн, Е.М. Ниобий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы / Е.М. Эпштейн, Т.Ю. Усова, Н.А. Данильченко и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 8. – М.: ВИМС, 2000. – 103 с.

80. Gupta, C.K. Extractive Metallurgy of Niobium / C.K. Gupta, A.K. Suri // CRC Press. – 1994. – 225 p.

Фондовая

81. Геолого-экономическая оценка минерально-сырьевых ресурсов редких металлов в районах формирования центров экономического развития (ЦЭР) России с целью повышения их инвестиционного потенциала: отчет о НИР / Архипова Н.А., Усова Т.Ю., Калиш Е.А. и др. – Москва: ФГУП «ИМГРЭ», 2014. – 884 с.

82. Геолого-экономическая оценка промышленной значимости ресурсного потенциала редких металлов территории Российской Федерации: отчет о НИР / Усова Т.Ю., Фомин М.Ф., Архипова Н.А., и др. – Москва: ФГУП «ИМГРЭ», 2009. – 344 с.

83. Определение перспектив эффективного использования и развития сырьевой базы редких металлов (Nb, Ta, Be, Li, Zr, TR) России с учетом современных технологий изучения и освоения месторождений: отчет о НИР / Быховский Л.З., Кудрин В.С., Усова Т.Ю. и др. – Москва: ВИМС, РАН ИМГРЭ, 2000. – 627 с.

84. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на Большетагнинском апатит-редкометалльном месторождении и Ярминском торий-редкометалльном рудопроявлении за 1988-92 гг. / Василенко А.А., Полетаев А.Н., Фалин В.Е. и др. – Иркутск: ГГП «Иркутскгеология», 1993. – 481 с.

85. Полупромышленные технологические испытания руд Чуктуконского месторождения (Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2006 г.) / Ломаев В.Г., Кузьмин В.И., Цыкина С.В. и др. – Красноярск: ГПКК «КНИИГИИМС», ИХХТ СО РАН, 2006. – 704 с.

86. Проведение геолого-технологического картирования, разработка принципиальной схемы переработки природных типов руд с получением товарной продукции и разработка ТЭО временных разведочных кондиций на Северном и Южных участках Томторского рудного поля: отчет о НИР / Томашев А.В. и др. – Москва: ФГБУ «ВИМС», 2016. – 544 с.

87. Разработка принципиальной технологии переработки тонковкрапленных редкометалльных руд Большетагнинского месторождения с ее технико-экономической оценкой, составление ТЭС для обоснования предварительной разведки: отчет о НИР / Лифиренко В.Е., Петрова Н.В., Соколовский Ю.А. и др. – Москва: ВИМС, 1992.

88. Разработка программы ГРП в рамках утвержденной правительством РФ подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов»: отчет о НИР / Котельников Е.И., Быховский Л.З. и др. – Москва: ФГУП «ВИМС», 2014. – 528 с.

89. Технологическая и геолого-экономическая переоценка Белозиминского и Большетагнинского месторождений: отчет о НИР / Отрубянников Ф.И., Быховский Л.З., Темнов А.В. и др. – Москва: ФГУП «ВИМС», 2012. – 3711 с.

90. Технологическая и геолого-экономическая переоценка месторождений металлургических видов минерального сырья с целью повышения их инвестиционной привлекательности: отчет о НИР / Темнов А.В., Литвинцев Э.Г., Броницкая Е.С. и др. – Москва: ФГУП «ВИМС», 2007. – 2637 с.

Электронные ресурсы

91. Редкости появятся позже: запуск ГОКа на базе Зашихинского месторождения редких металлов перенесен. Новость от 22.01.2015 г. АО «Коммерсантъ». Режим доступа: <http://www.kommersant.ru/doc/2650913>.

92. Восток Инжиниринг. ТриАрк Майнинг. Режим доступа: <http://threearc.ru/about/detail.php?ID=5>.

93. Годовой отчет ОАО «Соликамский магниевый завод» за 2015 г. Соликамск, 2016, 108 с. Режим доступа: http://смз.пф/raport/2016/2015_godovoj_otchet_smz_2015_dlja_sajta.pdf.

94. Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Утверждена постановлением Правительства РФ № 328 от 15.04.2014 г. Портал государственных программ Российской Федерации. Режим доступа: <http://programs.gov.ru/Portal/files/download?id=EDAA38B7-112C-4A11-8B0C-2D987B98F9EA>.

95. Стратегия развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года. Утв. приказом Минпромторга России от 5 мая 2014 г. № 839. Режим доступа: http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/strategiya_razvitiya_chernoy_i_cvetnoy_metallurgii_rossii_na_2014_-_2020_gody.pdf.

96. ТриАрк Майнинг. Новости. Режим доступа: <http://threearc.ru/news>.

97. Цены на редкоземельные металлы на рынке Китая. Infogeo.ru. Режим доступа: <http://www.infogeo.ru/metalls/worldprice/?act=rzm>.

98. Filho, A.I., Riffel, B.F., and Sousa, C.A.deF., 2009, Some aspects of the mineralogy of CBMMniobium deposit and mining and pyrochlore ore processing – Araxá, MG, Brazil: Araxá, Minas Gerais, Brazil, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 15 p. Режим доступа: <http://www.cbmm.com.br/Repositorio/Media/site/internas/operations/minerologyaspectsniobiumdeposit.pdf>.

99. International Energy Agency. Режим доступа: <http://www.iea.org>.

100. Malawi Government's side on Globe Metals & Mining Kanyika Niobium Project – Mining & Trade Review (April 2016). Mining in Malawi. Режим доступа: <https://mininginmalawi.files.wordpress.com/2016/04/mining-trade-review-april-2016-edition-electronic-copy.pdf>.

101. MetalResearch LLC / Аналитическая группа «Металлургические исследования». Режим доступа: <http://www.metalresearch.ru/index.html>.

102. Tantalum-niobium International study center (TIC). Режим доступа: <http://www.tanb.org>.

103. Technical report NI 43-101. Update on Niobec Expansion. Vallieres, D., Pelletier, P., Gaultier, P., et al. December 10th, 2013, 305 p. Режим доступа: <http://www.infomine.com/index/pr/PB/39/92/PB399298.PDF> (30.01.2015).