

УДК 553.522:549.0:622.7 (470.55)

© В.И. Попова*, А.Г. Баженов*, д.чл. УАГН В.А. Попов*,
В.Е. Ахлюстин**, В.А. Муфтахов*

**ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СОСТАВА ЩЕЛОЧНЫХ
ПОРОД ВИШНЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НА КАЧЕСТВО НЕФЕЛИН-ПОЛЕВОШПАТОВОГО
СЫРЬЯ (Южный Урал)**

**Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс*

***ОАО Вишневогорский ГОК, пос. Вишневогорск*

V.I. Popova, A.G. Bazhenov, V.A. Popov, V.E. Achlyustin,
V.A. Muphtakhov

**COMPOSITION HETEROGENESIS INFLUENCE OF THE
ALKALINE ROCKS FOR QUALITY OF NEPHELINE-
FELDSPAR RAW MATERIALS**

Автореферат

Исследованы неоднородность щелочных пород Вишневогорского массива, разрабатываемых карьерами на г. Долгой Вишневогорским ГОКом для получения нефелин-полевошпатového концентрата, состав породообразующих минералов миаскитов и технологических продуктов их обогащения. Наиболее продуктивными являются существенно микроклиновые лейкократовые миаскиты, не подвергшиеся деформации и воздействию более поздних процессов минералообразования. Содержание FeO в нефелине составляет в среднем 0.11–0.12 мас.%, а в полевых шпатах 0.05 мас.% и менее, поэтому высококачественный товарный продукт (содержащий менее 0.1 мас.% Fe₂O₃) можно получать из лейкократовых разновидностей миаскитов с умеренным количеством нефелина. Для контроля за содержанием нефелина предложены метод окрашивания нефелина метиленовым голубым (в породах и концентратах) и графическое определение объемной доли нефелина по соотношению Al₂O₃–SiO₂ или по содержанию Al₂O₃ в мелкозернистом нефелин-полевошпатovém концентрате товарных продуктов (с относительной погрешностью 10–15%).

Миаскиты в Вишневых горах впервые были выделены А.П. Карпинским в конце XIX в. [4], а ранее в Ильменских горах – И. Менге [7; под названием “ильменский гранит”] и Г.Розе [13; “миасцит”]. Нефелиновые сиениты Ильменских и Вишневых гор на Урале еще в начале XX века рассматривались русскими исследователями как возможное сырье для стекольной и керамической промышленности [1, 3, 8]. Эти работы показали эффективность использования нефелина и нефелиновых сиенитов в стекольной и керамической промышленности вместо полевого шпата, что привлекло внимание канадских специалистов, и в Канаде, в провинции Онтарио, с 1935 г. стали разрабатываться нефелиновые сиениты массива Блю-Маунтин, а позднее в Норвегии – массива о-ва Схернё [5].

В Вишневых горах в 1926 г. в Курочкином логу были обнаружены крупные жильные тела миаскитовых пегматитов, в которых по объему преобладал полевой шпат; в 1929–31 гг. А.С. Амеландовым и Ф.И. Рукавишниковым проведена разведка Вишневогорского месторождения полевого шпата, которое отработывалось более 10 лет. В 1941 г. в процессе исследования и отработки цирконовых россыпей М.Г. Исаковым было установлено промышленное пироклоровое оруденение в пегматитах, разведывавшееся затем под руководством А.А. Иванова, и в 1943 г. для добычи пироклора создан Вишневогорский рудник (впоследствии Вишневогорское рудоуправление, затем горно-обогатительный комбинат, или ГОК).

Промышленное производство нефелин-полевошпатového концентрата было налажено в Вишневых горах с 1968 г., когда Вишневогорским рудоуправлением отработывалась редкометальная рудная зона 140, из руд которой получали пироклоровый концентрат и, попутно, нефелин-полевошпатový для стекольной и керамической промышленности. В период 1993–1994 гг. отработывались пески-хвосты обогащения редкометальных руд, но нефелин-полевошпатové концентраты имели не лучшее качество и, как следствие, нестабильный спрос. В связи с ликвидацией подземной добычи ниобиевых руд с 1994 г. Вишневогорский ГОК переориентирован на выпуск нефелин-полевошпатových концентратов.

В 1993 г. геологической службой ГОКа было проанализировано строение Вишневогорского массива с целью выявления промышленных участков для получения нефелин-полевошпатовых концентратов со следующих позиций:

1) объект разведки и последующей добычи должен иметь состав, приближающийся к составу ранее перерабатываемых руд (миаскиты);

2) размеры его должны обеспечивать масштабы разведочных и последующих добычных работ (запасы и перспективы их прироста);

3) условия отработки – карьер;

4) расположение – не более 3–5 км от обогатительного комплекса;

5) для минимального воздействия на окружающую среду участок должен быть расположен в районе старых отвалов и отработанных на ниобиевые руды карьеров.

Этим условиям отвечает гора Долгая, ее северо-западный склон, где были проведены поисково-оценочные и разведочные работы [2]. Государственной комиссией по запасам (ГКЗ) в 2001 г. утверждены кондиции и запасы месторождения, отрабатываемого двумя карьерами – Южным и Северным (рис. 1). Проведение работ осложнялось уникальностью состава и строения месторождения, а также отсутствием месторождений-аналогов. Оказалось, что количество высококачественных руд (пород) составляет ~ 30 % общего объема месторождения, поэтому необходимо проведение дополнительных геологоразведочных работ для выявления наиболее продуктивных участков.

Согласно техническим требованиям к полевошпатовым материалам (табл. 1), главным показателем качества готовой продукции является содержание окислов железа, определяющее их марку. Миаскиты г. Долгой позволяют выпускать нефелин-полевошпатовый концентрат марки ПШС–02, что вызвало увеличение спроса на продукцию предприятия.

Технологический процесс получения нефелин-полевошпатового концентрата включает следующие операции: измельчение до –0.5 мм; мокрую магнитную сепарацию; флотацию (кальцитовую, коллективную и биотитовую) и сухую магнитную сепарацию. Основным товарным продуктом является конечный нефелин-полевошпатовый концентрат (далее – «гото-

вый шпат»), но ряду потребителей отгружается и камерный продукт (после флотации, без сухой магнитной сепарации).

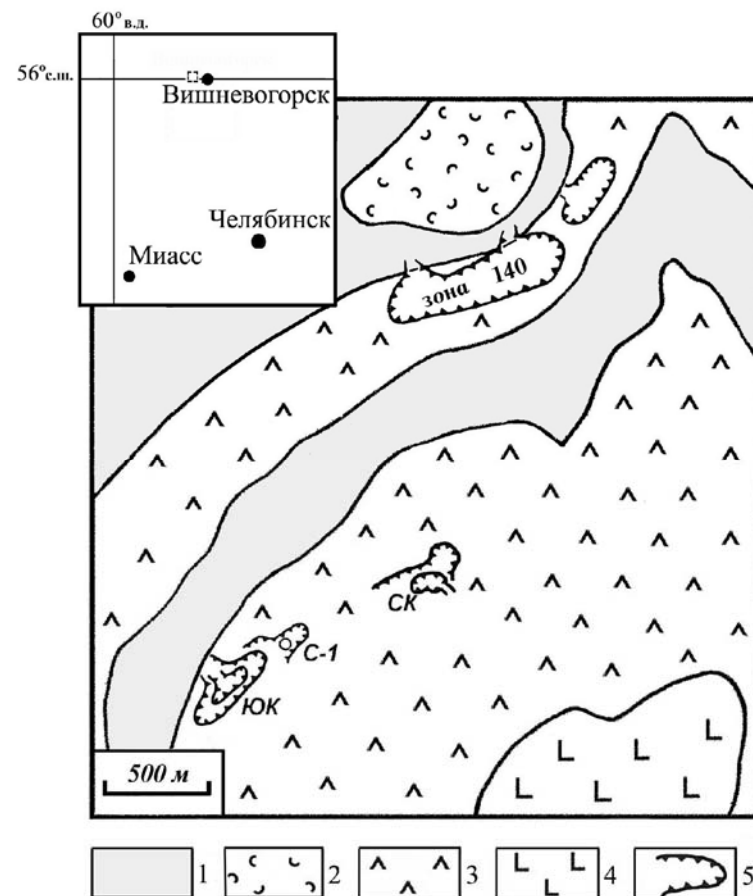


Рис. 1. Геологическая схема северо-западной части Вишневых гор.

1 – вишневогорская свита (гнейсы, амфиболиты, кристаллосланцы); 2 – серпентиниты Булдымского массива; 3-4 – Вишневогорский массив: 3 – миаскиты и щелочные сиениты Главного тела и Седловидной залежи, 4 – подинтрузивный щелочной комплекс (биотит-полевошпатовые породы, карбонаты, антипертитовые миаскиты); 5 – контуры карьеров на г. Долгой (СК – Северный карьер, ЮК – Южный).

Таблица 1

Технические требования к полевошпатовым материалам
для производства стекла и керамики
(по ТУ 5726-036-00193861-96)

Показатели, мас. %	Норма по сортам					
	Для стекольной промышленности				Для электровакуумной промышленности	
	ПШС-0.20-21	ПШС-0.25-21	ПШС-0.30-21	ПШС-0.50-21	НПШС-0.20-21	НПШС-0.30-21
<i>Химический состав</i>						
Fe ₂ O ₃ , не более	0.20	0.25	0.30	0.50	0.20	0.30
Al ₂ O ₃	≥ 21	≥ 21	≥ 21	≥ 21	21-22	21-22
K ₂ O	≥ 13	≥ 13	≥ 13	≥ 13	6.0-7.0	6.0-7.0
Na ₂ O					7.0-8.0	7.0-8.0
SiO ₂	< 62	< 62	< 62	< 62	59-61	59-61
CaO					1.0	1.0
H ₂ O, не более	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
<i>Остаток на сетке</i>						
№ 08, не более	Без ограничений				Отсутствие	Отсутствие
№ 063, не более	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

С началом обработки руд Северного участка появились сложности на обогатительной фабрике - снижение выхода готовой продукции и нестабильность технологических свойств руд. Это вынуждало технологов постоянно изменять режим измельчения и реагентный режим флотации.

Нами проведено исследование неоднородностей состава щелочных пород Северного и Южного участков г. Долгой, влияния этих неоднородностей на качество выпускаемой продукции и анализ возможностей совершенствования технологического процесса переработки нефелин-полевошпатовых руд с повышением качества и увеличением выхода готовой продукции.

В процессе исследований выполнено:

- геолого-петрографическое картирование щелочных пород в уступах Северного карьера на горизонтах 420 и 408 м и обследование уступов Южного карьера с выявлением преобладающих типов щелочных пород;

- определение в образцах пород содержаний, величины и формы зерен разных минералов с применением диагностического окрашивания нефелина и калишпата в миаскитах;

- исследование шлифов и аншлифов миаскитов и микронзондовый анализ состава минералов;

- контрольный минералогический анализ 9 технологических продуктов одной партии обогащения (пробы 3/07) с определением в них средних содержаний минералов, в особенности железосодержащих;

- методом кислотного растворения определено содержание нефелина в конечном продукте – готовом шпате;

- по сопоставлению данных минералогического и химического анализов технологических продуктов пробы 3/07 построены графики для экспрессного определения массовой доли нефелина в суммарном нефелин-полевошпатовом концентрате товарных продуктов – в камерном (после флотации) и в готовом шпате.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИБОРЫ

1. Окрашивание нефелина.

Срез или ровный скол породы протравливают парами соляной кислоты *HCl*. Стакан с *HCl* ставят на водяную баню, сверху на стакан кладут образец (срезом или сколом) на 5 минут. Затем образец окрашивают в слабом растворе метиленового голубого $[C_{10}H_{18}N_3S]Cl$ в течение 1–2 мин. до появления на нефелине тонкой бледно-голубой пленки, хорошо заметной визуально и в лупу. Можно окрашивать и шлиф без покровного стекла, а также сыпучий мелкий нефелин-полевошпатовый концентрат (препарат на липкой ленте). Имеющиеся в сечении образца зерна кальцита затравливаются с образованием глубоких ямок растворения (без окрашивания).

2. Окрашивание калишпата.

Срез или ровный скол породы протравливают в течение 1

мин. путем наложения фильтровальной бумаги, смоченной в концентрированной плавиковой кислоте HF . Фильтр удаляют, образец слегка ополаскивают в чистой воде и опускают в темно-оранжевый раствор кобальтинитрата натрия $Na_3[Co(NO_2)_6] \cdot 0.5H_2O$ на 2–3 мин.; на калишпате (если он есть) появится ярко-желтая пленка.

3. Определение объемных содержаний минералов в образцах проведено площадным методом (по соотношению площади всех зерен минерала к анализируемой площади образца) и методом линейных сечений (по соотношению длины всех зерен минерала к длине анализируемого профиля как среднее из нескольких профилей).

4. Определение содержаний суммы магнитных и электромагнитных минералов проведено весовым методом после обработки магнитом Сочнева и взвешиванием на аналитических весах магнитной фракции; массовая доля магнитной фракции определялась по отношению к исходной пробе.

5. Определение объемных содержаний минералов во фракции -0.5 мм технологических проб проводилось площадным методом под биноклем в иммерсии (в воде – для уменьшения слипания зерен) с использованием сравнительных диаграмм. Содержание кальцита определялось по воздействию HCl на зерна (по вскипанию).

6. Петрографическое описание шлифов выполнено с применением микроскопа МПСУ, минераграфические исследования рудных минералов – на микроскопе Axiolab–2.0 Karl Zeiss, состав минералов изучен на микрозонде JXA-733 Superprobe.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Миаскиты на Южном Урале слагают два массива – Вишневогорский и Ильменогорский, а также несколько пластовых и седловидных тел, серию даек и пегматитовых жил. Вишневогорский массив субмеридионально вытянут на 25 км при ширине 4 км и локализован в метаморфических породах вишневогорской толщи рифея – гнейсах, сланцах, амфиболитах, кварцитах, которые в экзоконтактах массива фенитизированы в разной степени.

Разрабатываемое Вишневогорское месторождение нефе-

лин-полевошпатового сырья расположено на северо-западном фланге Главного (Центрального) миаскитового тела Вишневогорского массива. Это тело имеет форму седловидной залежи мощностью до 0.5 км, которая облекает с севера находящийся в ядре массива подинтрузивный щелочной комплекс [6], протягивающийся далеко на юг, вплоть до Ильмен, где он описан как Центральная щелочная полоса [11]. С севера эта залежь облекается пачками кристаллосланцев вишневогорской толщи, образующих антиклинальный свод. Среди них залегает Седловидная залежь миаскитов и щелочных сиенитов меньшей мощности; к ее висячему боку приурочен рудный штокверк зоны 140 (см. рис. 1).

Главное тело Вишневогорского массива сложено биотитовыми двуполевошпатовыми нефелиновыми сиенитами (миаскитами), которые состоят из микроклин-пертита, нефелина, кислого плагиоклаза (олигоклаз-альбита и альбита) и железистого биотита с примесью кальцита и аксессуарных минералов – ильменита, магнетита, циркона, апатита и других. Подинтрузивный щелочной комплекс сложен чередующимися лейкократовыми и меланократовыми щелочными метасоматитами, нефелин-антипертитовыми мигматитами, антипертитовыми миаскитами, карбонатитоидами и карбонатитами.

Действующий Южный карьер разрабатывает миаскиты Главного тела вблизи контакта висячего бока. Для обеспечения перспектив предприятия заложен опытный Северный карьер, обнаживший более глубокие уровни этой залежи.

НЕОДНОРОДНОСТИ СТРОЕНИЯ МАССИВА ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД г. ДОЛГОЙ

На г. Долгой в уступах Северного карьера вскрыты разные по составу и структуре миаскиты, карбонатитоиды, карбонаты, слюдиты и пегматиты (рис. 2, табл. 2).

Преобладающими породами, составляющими около 50 % разреза, являются светло-серые миаскиты, среднезернистые до крупно- и мелкозернистых, пятнисто-полосчатой текстуры. Миаскиты на отдельных участках обогащены ильменитом и магнетитом с величиной зерен до 1.5 мм и более (до 1–1.5 % объема) и (или) пирротинном с полигонально-таблитчатой или

толстотаблитчатой формой зерен величиной 0.1–0.5 мм (до 0.2–0.3% объема). Рудные минералы образуют включения, вытянутые по сланцеватости; зерна ильменита и магнетита имеют сложные ограничения. Биотит, наряду с мелкими таблитчатыми кристаллами (0.8–1 мм) простых контуров, образует много мельчайших чешуек (0.03–0.1 мм), имеющих сложные срастания с другими минералами. Крупнозернистый миаскит имеет однородную структуру, близкую к трахитоидной. Он состоит из параллельно вытянутых пластинчатых зерен полевого шпата (мезопертита с равными содержаниями микроклина и альбита) и более редких овальных зерен нефелина, между которыми располагаются четкие таблички биотита (от 0.2–2 мм до 2–5 мм).

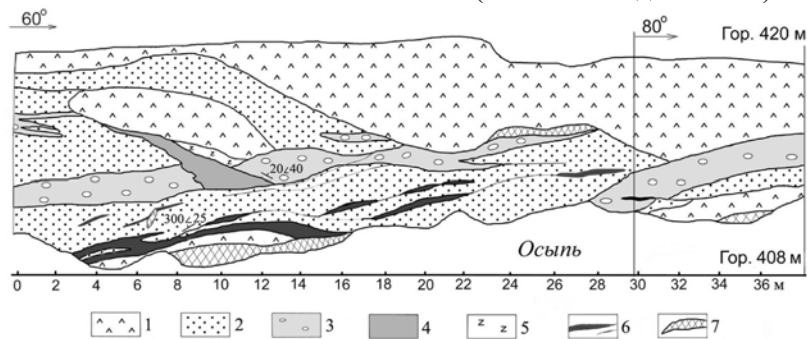


Рис. 2. Неоднородность строения Главного тела щелочных пород в Северном карьере г. Долгой.

1 – миаскит светло-серый среднезернистый; 2 – миаскит серый мелко-среднезернистый; 3 – карбонатит мезократовый катаклазированный с обломками миаскитов и крупных кристаллов полевого шпата, нефелина, канкринита; 4 – карбонатит мезо-меланократовый крупнозернистый; 5 – цеолитизированный миаскит; 6 – слюдиты кальцит-биотитовые и полевошпат-кальцит-биотитовые; 7 – пегматиты миаскитовые. Зарисовка В. И. Поповой.

Светло-серые миаскиты перемежаются с серыми и темно-серыми миаскитами. Серые миаскиты большей частью катаклазированы и представляют собой грубо- и мелкополосчатую породу с полосками обогащения биотитом и кальцитом, линзочками и полосками пегматоидов, полевошпатовыми и кальцитовыми полосками и с полосчатым распределением скоплений мелких зерен ильменита и пирротина; форма зерен ильменита, магнетита и биотита сложная. Нефелин в них имеет серый и розовато-серый цвет из-за мельчайших пойкилитовых вростков

биотита и иногда – магнетита. Контакт этих миаскитов аз. пад. $\sim 20^\circ \angle 40-50^\circ$ довольно четкий.

Таблица 2

Минеральный состав щелочных пород г. Долгой
Вишневогорского массива

Минералы	Содержание в породах, % объема						
	1	2	3	4	5	6	7
Калишпат	65	64	25	40	15	2	40
Плагиоклаз	9	8	3	3	10	ед.	10
Нефелин	16	18	70	22	13	ед.	30
Биотит	6	6	1	16	32	65	10
Кальцит	2	3	ед.	17	25	30	5
Канкринит	ед.			1	1		2
Ильменит	1.2	0.3	0.3	0.5	1	0.3	1
Магнетит	ед.	0.1	ед.	0.1	0.2	0.1	0.2
Пирротин	0.2	ед.	0.2	0.1	ед.		
Циркон	ед.	ед.	0.3	0.2	ед.	1	1
Прочие	Ап, Пх, Пи, Хп	Ап, Пи	Пх	Ап, Пх	Ап 2; Пх	Ап 1	Ап 2; Пх 0.3; Нат 1; Сод

Примечание: 1 – миаскит светло-серый среднезернистый (обр. СК1-7), 2 – миаскит серый полосчатый (обр. СК1-1), 3 – ювит (обр. ЮК-6), 4 – мезократовый карбонатитоид (обр. СК1-8), 5 – меланократовый карбонатитоид (обр. СК1-6), 6 – кальцит-биотитовая порода (слюдит; обр. СК1-5), 7 – пегматит миаскитовый (обр. СК1-4). Сокращения: Ап – апатит, Нат – натролит, Пи – пирит, Пх – пиррохлор, Сод – содалит; СК – Северный карьер, ЮК – Южный карьер.

Миаскиты пересечены зонами мезократовых биотит-кальцит-нефелиновых и меланократовых нефелин-кальцит-биотитовых пород (карбонатитоидов) с существенно меньшими содержаниями калишпата – от 20 % в меланократовых разностях до 40 % в мезократовых. Карбонатитоиды порфириформно-катаклазированной текстуры (так называемые “горошковые брекчии”) содержат крупные кристаллы и обломки нефелина, канкринита, апатита, калишпата, а также многочисленные обломки миаскитов, часто округлые. Мезократовые и меланократовые карбонатитоиды залегают кулисообразно, мощностью 1–2 м, в основном аз. пад. $300^\circ \angle 20-25^\circ$, реже – аз. пад. $20^\circ \angle 40^\circ$ и секутся маломощными (10–50 см) зонами слюдитов (кальцит-биотитовых и полевошпат-кальцит-биотитовых пород) с преоб-

ладающим аз. пад. $300^\circ \angle 20-25^\circ$. Слюдиты иногда сопровождаются карбонатом – крупнозернистой кальцитовой породой с биотитом. На контакте с карбонатом миаскит неоднороден: тонкозернистые участки в нем чередуются со средне- и крупнозернистыми нефелин-полевошпатовыми и полевошпатовыми.

Пегматитовые полевошпат-нефелиновые и нефелин-канкринит-полевошпатовые линзовидные жилы, мощностью до 0.5–1 м, часто содержат канкринит, вишневит и цеолиты; цеолитизация проявлена и в участках интенсивной деформации миаскитов, особенно на контактах разных пород.

Все породы довольно интенсивно деформированы. Тонкополосчатые лейкократовые породы, возможно, являются бластокатаклазитами. Они имеют порфирированную структуру. Более крупные округлые зерна нефелина (2–3 мм) и редкого микроклина окружены тонкозернистым альбит-микроклиновым агрегатом (соотношение микроклин : альбит = 5 : 1), почти без нефелина. Структура этого агрегата регулярная пластинчато-зернистая. В нем равномерно распределены таблички биотита и более мелкие, чем другие минералы, кристаллики магнетита. С цепочками крупных зерен нефелина связаны скопления и сростки табличек биотита, скопления зерен ильменита и пирротина со сложными контурами.

Миаскиты Южного карьера в целом более однородны по составу, и доля карбонатитоидов и слюдитов здесь незначительна.

В северном, северо-западном и северо-восточном бортах Южного карьера (гор. 372–384 м) абсолютно преобладают светло-серые средне- и крупнозернистые микроклиновые миаскиты с меньшими содержаниями биотита (3–4 %) и маломощными полосами серого, темно-серого и желтовато-беловатого цвета, несколько различающимися соотношением минералов – нефелина, микроклина, альбита, биотита. Из аксессуарных минералов характерен ильменит (до 1–2 %) и редкие магнетит, пирротин, пирит, халькопирит, лимонит, циркон, пироксид, апатит.

Серые мелкозернистые миаскиты (составляющие около 20–30 % пород) отличаются повышенным количеством биотита (18 %) и почти не несут других железосодержащих минералов; зерна биотита в них пластинчатые, величиной 0.2–1 мм, и будут легко удаляться при обогащении.

Среди миаскитов встречаются полосы мощностью 0.5–1 м желтоватых нефелиновых сиенитов (ювитов) с содержанием нефелина около 50–70 %, с весьма малым количеством кальцита и аксессуарных минералов (см. табл. 2, ан. 3).

Жила меланократового биотитового карбонатитоида мощностью 1–1.5 м, аз. пад. $300-310^\circ \angle 40-50^\circ$, вскрытая в северной и северо-западной стенках Южного карьера, по составу является переходной к слюдитам, отмеченным в Северном карьере.

Восточнее Южного карьера миаскиты дали плохой выход нефелин-полевошпатового концентрата (40–60 %). Для выяснения причины этого исследованы несколько образцов и шлифов различных миаскитов (из района скважины С-1; см. рис. 1). В коренных породах (около устья скважины) светло-серый однородный среднезернистый миаскит сменяется преобладающим серым мелкозернистым миаскитом, нередко с пятнистым распределением биотита. Те и другие миаскиты богаты нефелином (около 30 %), контуры зерен биотита и рудных минералов простые. Серый полосчатый миаскит содержит 28 % нефелина, полоски отличаются по структуре, чередуются мелко- и среднезернистые. Мелкозернистые полоски обладают однородной, почти трахитоидной структурой, нефелин и полевой шпат в них не изменены. В среднезернистых полосках полевой шпат интенсивно пертитизирован, зерна нефелина окружены тонкими каемками канкринита. В пятнистых миаскитах отмечаются каемки канкринита вокруг зерен нефелина, а также сеточка тонких жилок канкринита внутри некоторых зерен, которые макроскопически не видны, но хорошо выявляются под микроскопом в поляризованном свете. Возможно, каемки канкринита явились причиной плохого выхода концентрата. Канкринит при кальцитовой флотации может уходить в пенный продукт, захватывая и нефелин, зерна которого практически полностью окаймлены канкринитом.

В целом полоса щелочных пород в районе Северного карьера принадлежит к переходной зоне между залежью микроклиновых миаскитов, вскрытых Южным карьером, и породами подинтрузивного комплекса (или Центральной щелочной полосы), о чем свидетельствуют как сложное чередование различных пород, так и наличие миаскитов с мезопертитовым полевым шпатом, присутствие которого свойственно породам Центральной

щелочной полосы и переходной зоны [10].

СОСТАВ МИНЕРАЛОВ МИАСКИТОВ г. ДОЛГОЙ

Микрозондовые исследования состава минералов прежде всего были направлены на определение содержания железа в породообразующих минералах г. Долгой – в полевых шпатах, нефелине, биотите, кальците; проанализированы также магнетит и ильменит (табл. 3).

Таблица 3
Состав минералов миаскитов г. Долгой (мас.%)

№ проб	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сум-ма
Калиевый полевой шпат										
СК 2-1/1	65.32	-	18.33	-	-	-	-	1.95	14.33	99.93
СК 2-4/2	64.94	-	18.92	-	-	-	-	2.16	13.95	99.97
СК 2-6/3	65.34	0.06	18.90	-	-	-	-	1.88	13.75	99.93
ЮК2-4	64.88	-	19.29	-	-	-	0.27	1.03	14.49	99.96
ЮК2-9	64.29	-	20.20	-	-	-	-	1.53	13.93	99.95
ЮКС 1-2/2	64.80	-	19.90	0.09	-	-	-	1.93	13.22	99.94
Альбит										
СК 2-1/3	68.03	-	19.34	0.23	-	-	0.05	12.17	0.15	99.97
СК 2-1/5	67.04	-	20.31	-	-	-	-	12.58	0.05	99.98
СК 2-1/7	66.55	-	20.20	-	-	-	0.10	13.01	0.12	99.98
СК 2-4/3	66.90	-	20.24	-	-	-	0.09	12.71	-	99.94
СК 2-6/1	67.10	-	19.98	0.06	-	-	0.08	12.58	0.15	99.95
ЮК 2-3	68.53	-	18.80	-	-	-	0.30	11.91	0.40	99.94
ЮК 2-5	65.98	-	20.85	0.06	-	-	0.24	12.54	0.30	99.97
ЮКС 1-2/1	67.26	-	20.09	0.05	-	-	0.17	12.29	0.12	99.98
Нефелин										
СК 2-1/8	41.21	-	35.40	0.12	-	-	0.16	17.24	5.84	99.97
СК2-4/1	41.79	-	34.31	0.08	-	-	0.05	17.81	5.94	99.98
СК2-6/6	41.78	-	34.38	0.06	-	-	-	17.43	6.31	99.96
ЮК2-7	40.91	-	35.10	0.13	-	-	-	17.75	6.09	99.96
ЮК2-8	40.94	-	35.20	0.14	-	-	0.05	17.77	5.87	99.97
ЮКС1-2/5	40.89	-	35.17	0.14	-	-	-	17.75	6.02	99.97

Продолжение таблицы 3

№ проб	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сум-ма
Биотит										
СК2-1/4	32.59	5.39	14.28	29.16	0.85	4.39	-	0.20	8.96	95.82
СК2-1/6	32.24	4.73	14.90	29.62	0.97	4.14	-	0.21	8.97	95.78
СК2-4/4	31.99	4.59	15.91	28.90	0.75	4.23	-	0.24	9.05	95.65
СК2-6/4	31.24	4.32	15.87	31.32	0.40	3.34	0.06	0.23	8.73	95.71
ЮК2-2	31.19	4.08	15.03	31.39	0.30	4.25	0.23	0.22	8.92	95.60
ЮКС1-2/4	32.04	4.79	14.90	29.98	0.87	4.80	-	0.22	8.17	95.77
ЮКС1-2/7	31.74	4.67	15.06	30.39	0.86	4.37	-	0.25	8.33	95.68
Кальцит										
СК2-4/8	0.15	-	0.10	0.97	1.25	0.12	52.92	0.26	0.04	55.81
ЮКС 1-2/6	-	-	-	0.89	1.40	0.23	53.35	0.15	-	55.62
Магнетит										
СК 2-4/7	0.08	0.20	0.25	92.47	0.07	-	-	-	-	93.07
СК 2-6/5	-	0.22	0.17	91.99	-	-	-	-	-	92.38
Ильменит										
СК 2-4/5	0.08	49.73	-	42.10	6.25	0.07	-	-	-	98.23
ЮКС 1-2/3	0.08	47.99	-	47.01	3.87	0.09	-	-	-	99.04

Примечание. Микрозонд JXA-733, аналитик Е. И. Чурин. Прочерк – не обнаружено (менее 0.05 мас.%); H₂O, CO₂ и SO₃ не определялись.

Собственно калиевые полевые шпаты и альбиты миаскитов из Северного и Южного карьеров г. Долгой характеризуются весьма низкими содержаниями FeO – порядка 0.05–0.06 мас.% и менее. При наличии субмикроскопических включений других железосодержащих минералов содержания FeO в полевых шпатах достигают 0.09–0.23 мас.%. Калишпаты из миаскитов Северного карьера отличаются чуть более высокими содержаниями кремния и пониженными – алюминия (по сравнению с миаскитами Южного карьера).

Нефелины содержат 0.06–0.14 мас.% FeO, при этом немного повышенная железистость и меньшее содержание SiO₂ отмечены для нефелина миаскитов Южного карьера.

Биотиты (лепидомеланы, или анниты) миаскитов характеризуются высокой железистостью с содержанием 29–31 мас.% FeO и 4–5 мас.% TiO₂. Исследования [9] показали, что среди пород г. Долгой преобладают лейкократовые миаскиты с малым

количеством биотита с железистостью $f = 85-86 \%$. Биотиты мезократовых миаскитов и лейкократовых миаскитовых пегматитов характеризуются близкой железистостью. Наиболее железистый биотит ($f = 87.8 \%$) отмечен в ювите, где нефелина $> 50 \%$ объема. Карбонатитоиды и карбонатиты и их жильные аналоги содержат биотиты с $f = 72-76 \%$. Фтормагнезиальный флогопит из слюдита существенно менее железистый ($f = 50 \%$).

В кальцитах содержания FeO составляют порядка 0.9–1 мас.%, MnO – 1.2–1.4 мас.% при малом количестве магния.

Магнетит в миаскитах довольно часто имеет распадовые включения ильменита в разных количествах – от единичных до 2–3 % объема, ориентированные по {111} магнетита. По микронзондовым данным, чистый магнетит содержит около 0.2 мас.% TiO₂. Данные о более высоких содержаниях титана в магнетитах из миаскитов [12] отвечает содержанию 1–2 % ильменита в объеме магнетита. Ильменит в исследованных миаскитах г. Долгой содержит около 4–6 мас.% MnO и менее 0.1 мас.% MgO и обычно образует сростки с магнетитом и главными породообразующими минералами.

РЕЗУЛЬТАТЫ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБ

Продукты технологического обогащения миаскитов пробы 3/07 из Южного карьера г. Долгой были отобраны сотрудниками Исследовательской лаборатории Вишневогорского ГОКа на всех стадиях обогащения и включали как исходный и конечный продукты, так и “хвосты” магнитной сепарации и флотации. Последовательная цепочка обогащения – от исходной пробы № 1 к продуктам № 3 (питание флотации), № 7 (камерный после флотации) и № 9 (готовый шпат). Поскольку окончательное измельчение породы (руды) производилось в шаровых мельницах, то измельченная масса относительно неоднородна по крупности – от пылевидных частиц до 0.5–1 мм при среднем размере 0.2–0.3 мм.

Пылевидная составляющая весьма затрудняет минералогический анализ проб (доля фракции менее 0.1 мм в измельченной руде около 30 %, в готовом шпате около 10 %), поэтому калишпаты, альбит и нефелин учитывались совокупно. При отборе технологических продуктов невозможно проследить за одной и

той же частью пробы на каждой стадии обогащения, вследствие чего в результатах и минералогического анализа (табл. 4), и химанализа (табл. 5) есть некоторые вариации содержаний минералов и компонентов. Довольно часты сростания ильменита с магнетитом и биотитом, а также сростки породообразующих минералов с темноцветными. Характерно слипание частиц (флокуляция), поэтому в магнитной фракции есть и слипшиеся, и прилипшие зерна немагнитных минералов.

Таблица 4

Содержание некоторых минералов (% объема) в продуктах технологического обогащения миаскитов пробы 3/07

№ п/п	Продукт, фракция	Масса, г	Выход фракции, мас. %	Минералы				
				Би	Ил	Мг	Пир	Прочие
1	Измельченная руда	68.62		11.5	0.4	1.3	ед.	Нпш 813; Ка 45; Ли, Ти, Пи, Ц, Пх
	а) магнитная фракция		8.57	60	5	15	ед.	Нпш 20; Ка, Ли, Ти
	б) немагнитная фр.		91.43	7	-	-	-	Нпш 87; Ка 5; Ли, Ти, Пи, Ц, Пх
2	Магнитный мокрой сепарацией	118.42		9	8	57	ед.	Нпш 25.5; Ка 0.5; Ли, Ти
	а) магнитная фр.		81.13	8	10	70	ед.	Нпш 12; Ка, Ли
	б) немагнитная фр.		18.87	5	ед.	ед.	-	Нпш 82; Ка 3; Ти
3	Питание флотации	91.18		11	ед.	ед.	ед.	Нпш 84; Ка 5; Ли, Ти, Пи
	а) магнитная фр.		5.02	30	1	1	ед.	Нпш 63; Ка 5; Ли, Ти
	б) немагнитная фр.		94.98	10	ед.	ед.	ед.	Нпш 85; Ка 5; Ли, Ти, Пи
4	Пенный кальцитовый флотации М1	70.24		58.7	0.3	1.6	ед.	Нпш 14.7; Ка 24.5; Ти, Пи
	а) магнитная фр.		2.10	2	15	80	ед.	Нпш 3; Ти, Пи

Продолжение таблицы 4

№ п/п	Продукт, фракция	Масса, г	Выход фракции, мас. %	Минералы				
				Би	Ил	Мт	Пир	Прочие
	б) немагнитная фр.		97.90	60	-	-	-	Нпш 15; Ка 25
5	Пенный коллективной флотации М2	99.42		19.9	0.1	0.6	ед.	Нпш 49.4; Ка 29.6; Ли, Ти, Пи
	а) магнитная фр.		1.44	20	10	45	ед.	Нпш 25; Ка, Ли, Пи
	б) немагнитная фр.		98.56	20	ед.	ед.	-	Нпш 50; Ка 30; Ли, Ти
6	Пенный биотитовой флотации	99.27		3	0.1	0.3	-	Нпш 86; Ка 10; Ли
	а) магнитная фр.		0.94	10	10	35	-	Нпш 40; Ка 5; Ли
	б) немагнитная фр.		99.06	3	-	-	-	Нпш 87; Ка 10
7	Камерный из насоса флотации	153.07		1	ед.	ед.	ед.	Нпш 98; Ка, Ли, Ти, Ц, Пх, Ап
	а) магнитная фр.		0.22	2	20	8	ед.	Нпш 60; Ка 10; Ли, Ти, Ц
	б) немагнитная фр.		99.78	1	ед.	-	-	Нпш 98; Ли, Ти, Ц, Пх, Ап
8	Магнитный сухой сепарации	107.73		5	5.6	2	ед.	Нпш 84.7; Ка 2.8; Ли, Ти, Пи, Ап
	а) магнитная фр.		16.43	5	10	5	ед.	Нпш 73; Ка 7; Ли, Пи
	б) немагнитная фр.		83.57	5	4	1	ед.	Нпш 87; Ка 2; Ли, Ти, Пи, Ап
9	Готовый шпат	99.16		0.5	0.01	ед.	-	Нпш 99; Ка 0.2; Ли, Сод, Кан
	а) магнитная фр.		0.15	10	5	3	-	Нпш 82
	б) немагнитная фр.		99.85	0.4	-	-	-	Нпш 99.3; Ка 0.2; Ли, Сод, Кан

119

Сокращения к таблице 4: Би – биотит, Ил – ильменит, Мт – магнетит, Пир – пирротин, Нпш – нефелин+полевые шпаты, Ка – кальцит, Ли – лимонит, Ти – титанит, Пи – пирит, Ц – циркон, Пх – пироклор, Ап – апатит, Сод – содалит, Кан – канкринит. Среднее для проб рассчитано по результатам анализа фракций.

Таблица 5

Результаты химических анализов (мас.%) продуктов обогащения миаскитов

№ п/п	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	MgO	S
1	3.2	1.9	6.0	7.1	22.1	0.62	54.9	0.70	0.08
2	60.0	1.6	0.3	7.8	6.8	2.5	25.6	0.60	1.6
3	2.4	1.6	6.0	7.4	23.7	0.46	56.0	0.60	0.034
4	11.7	6.5	5.3	3.3	9.4	1.8	34.0	1.2	0.03
5	9.7	4.0	6.4	5.5	13.1	1.34	46.8	1.5	0.22
6	2.1	0.9	6.7	7.2	22.7	0.46	53.1	2.1	0.07
7	0.23	0.48	6.8	6.8	22.7	0.20	60.3	0.25	0.02
8	2.1	1.2	4.4	4.4	21.3	0.67	59.4	0.85	0.06
9	0.19	0.48	7.0	7.2	22.5	0.30	60.6	0.20	0.01

Примечание. Номера анализов (и тип продукта) соответствуют табл. 4. Анализы химлаборатории ОАО “Вишневогорский ГОК”. CO₂ и H₂O не определялись, Fe₂O₃ – общее.

Наибольшее удаление железосодержащих минералов достигается при мокрой магнитной сепарации и кальцитовой и коллективной флотациях. В готовом шпате (товарном продукте № 9) доля магнитной фракции составляет 0.15 мас.%, где около 18 % объема составляют железосодержащие минералы – биотит, магнетит, ильменит, - преимущественно в сростках с полевыми шпатами и нефелином. В немагнитной фракции готового шпата содержание биотита 0.5 %, кальцита 0.2 % объема. Камерный продукт из насоса флотации (№ 7) довольно близок к готовому шпату, но, несмотря на малую долю магнитной фракции, в ней преобладают магнетит и ильменит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам минералого-петрографических исследований и данным обогатительной фабрики наиболее однородная и самая благоприятная для получения нефелин-полевошпатового

120

концентрата часть Главного тела Вишневогорского массива в его висячем боку вскрыта Южным карьером. Здесь среднезернистые микроклин-пертитовые миаскиты – преобладающие породы, слагающие эту зону. Среди них выделяются разности с ненарушенной структурой с простыми границами зерен, с одиночными табличками биотита, а также разности с признаками милонитизации, полосчатые, местами с линзочками пегматоидной структуры. Карбонатитоиды и богатые биотитом катаклазиты здесь занимают ничтожный объем и не влияют на качество сырья.

Но уже вблизи северо-восточного борта карьера, возле скважины С-1, отмечена зона с полосами меланократовых пород, фиксирующих интенсивные дислокации, а в миаскитах отмечается пленочная канкринитизация нефелина. Все это: и присутствие меланократовых пород, и канкринитизация нефелина, – осложняет процесс обогащения.

В более глубоких горизонтах Главного седловидного тела, вскрытых Северным карьером, микроклин-пертитовые миаскиты чередуются с мезократовыми миаскитами (в них больше биотита, кальцита, меньшее содержание нефелина) и лейкократовыми порфириновидными миаскитами с мезопертитом. Все эти породы обладают простой структурой и не должны осложнять процесс обогащения. Негативным для обогащения является присутствие карбонатитов и сопровождающих меланократовых пород, зон интенсивно катаклазированных миаскитов, вплоть до милонитов, и продуктов низкотемпературных процессов – от канкринитизации до цеолитизации, что определяет необходимость селективной добычи лейкократовых миаскитов.

Нефелины и полевые шпаты миаскитов Ильменских и Вишневых гор (как и нефелиновых сиенитов Блю-Маунтин и Схернё) очень бедны железом, которое входит в них в виде изоморфной примеси или вростков минералов-экссоллютов (гематита, биотита, магнетита, ильменита, пирротина). Содержаие такого железа определяет предел качества нефелин-полевошпатового концентрата, какого можно достичь применяемыми методами обогащения.

Сопоставление результатов минералогического анализа с данными химического анализа технологических продуктов показывает, что в “хвосты” мокрой магнитной сепарации и каль-

цитовой флотации уходит относительно мало нефелин-полевошпатового концентрата, а “хвосты” биотитовой флотации и сухой магнитной сепарации уносят в себе значительную долю нефелина и полевых шпатов. Содержания MgO в продуктах обогащения показывают, что практически весь магний вносится биотитом; это же подтверждается и тем, что в исследованных нами породах г. Долгой не встречены значимые количества высокомагнезиальных минералов.

Данные химического анализа (см. табл. 5) подтверждают, что основное количество магнитных и слабомагнитных железосодержащих минералов при обогащении удаляется путем мокрой магнитной сепарации и флотации. По данным минералогического анализа видно, что после сухой магнитной сепарации (последней стадии обогащения) в готовом шпате еще остаются железосодержащие минералы – биотит, ильменит и магнетит, которые определяют железистость технологического продукта и часть могут быть удалены при лучшей магнитной сепарации.

При сопоставлении составов нефелина и полевых шпатов с данными минералогического и химического анализов выявлена возможность оценивать объемную долю нефелина в нефелин-полевошпатовых товарных продуктах, в которых оставшееся малое количество других минералов почти не скажется на результате. Рабочие поля этих диаграмм (рис. 3) позволяют графически определять объемные доли нефелина в суммарном нефелин-полевошпатовом концентрате с относительной погрешностью не более 10–15 % (например, в камерном продукте № 7 содержание нефелина около 21–22 % объема продукта, а в готовом шпате № 9 – около 20–21 %). В немагнитной фракции продукта № 9 методом растворения в HCl определено 22.5 мас.% нефелина (исключая 0.2 мас.% кальцита), что соответствует 22.3 % объемной доли нефелина в конечном товарном продукте исследованной пробы.

Используя данные о содержаниях и составе биотита в щелочных породах г. Долгой, можно предложить приемлемый метод слежения за степенью очистки перерабатываемых пород от биотита [9]. В условиях производства это, прежде всего, картирование типов пород в карьерах и по разведочным скважинам, с визуальной оценкой содержаний биотита. Содержание MgO в миаскитах составляет 0.05–0.6 мас.%. Поскольку в миаскитах

практически нет других магнийсодержащих минералов, кроме биотита, то содержание MgO в одном типе пород (в миаскитах) по данным химических анализов можно использовать для определения содержания биотита в породе (рис. 4 а). Другие типы пород – карбонатиты и карбонатитоиды, в которых биотита обычно больше, а железистость его ниже, – заметно отличаются от миаскитов по содержанию MgO (см. рис. 4 б-в). Высокая железистость биотита и небольшие его количества в миаскитах г. Долгой являются обнадеживающими для исключения дорогостоящей и трудоемкой операции флотации биотита и замены ее дополнительной электромагнитной сепарацией при обогащении.

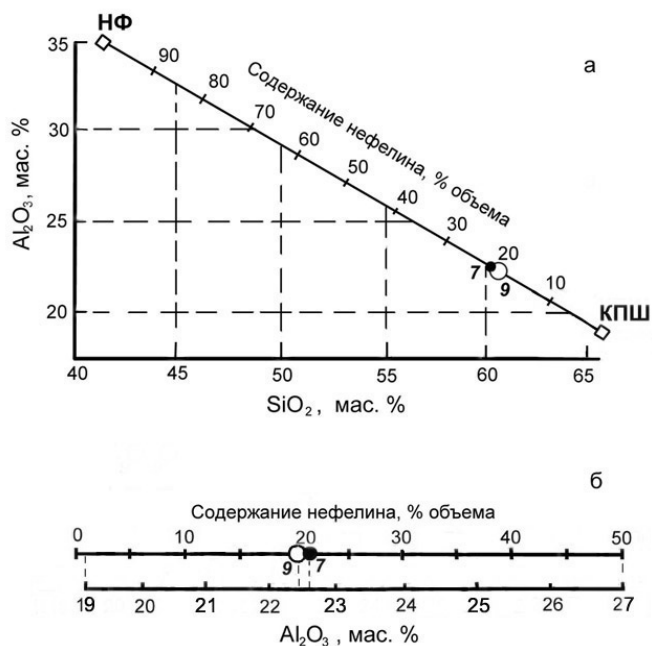


Рис. 3. Графики определения объемной доли нефелина (НФ) в суммарном нефелин-полевошпатовом концентрате по данным химанализов: а – по соотношению Al_2O_3 и SiO_2 ; б – по содержанию Al_2O_3 .

Точки НФ и КПШ – средние составы нефелина и калишпата в миаскитах г. Долгой, 7 – камерный продукт пробы 3/07 после флотации, 9 – готовый шпат.

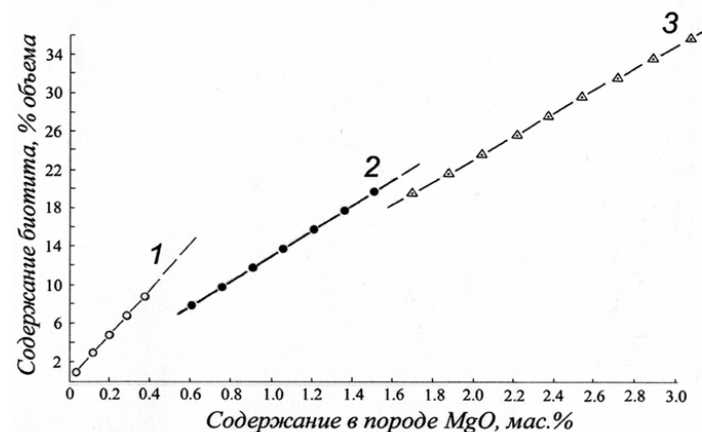


Рис. 4. Зависимость содержания MgO в породах г. Долгой от количества биотита разной железистости.

1 – миаскиты (биотит с содержанием MgO ~ 4.1 мас.%, $f = 85\%$); 2 – карбонатиты (в биотите MgO ~ 7.5 мас.%, $f = 75\%$); 3 – карбонатитоиды (в биотите MgO ~ 8.4 мас.%, $f = 73\%$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Щелочные породы, добываемые Вишневогорским ГОКом на г. Долгой Вишневогорского массива, неоднородны по структуре и составу и, как следствие, обогащаются по-разному. Наиболее продуктивными являются существенно микроклиновые лейкократовые светло-серые миаскиты, наименее подвергнутые деформации и воздействию более поздних процессов минералообразования. Для расширения перспектив добычи этого наиболее ценного сырья следует проследить распространение микроклин-пертитовых миаскитов методами геолого-минералогического картирования на всей площади месторождения.

При картировании и опробовании в карьерах и керне скважин можно оперативно следить за содержаниями разных минералов в породах методом линейных сечений, используя легкодоступный метод окрашивания нефелина (и одновременно – затравливания кальцита). Контроль содержаний и состава биотита в разных породах можно осуществлять по содержанию MgO (см. рис. 4).

Так как содержание FeO в нефелине составляет в среднем 0.11–0.12 мас.%, а в полевых шпатах 0.05 мас.% и менее, то высококачественный товарный продукт (содержащий менее 0.1 мас.% Fe₂O₃) можно получать из лейкократовых разностей миаскитов с умеренным количеством нефелина. Повышенные содержания железа в готовом продукте были обусловлены в основном недостаточно эффективной сухой магнитной сепарацией (что впоследствии отрегулировано на фабрике).

Ввиду технических трудностей минералогического анализа мелкой и, в особенности, пылевидной фракции продуктов обогащения, содержание нефелина в суммарном нефелин-полевошпатовом концентрате товарных продуктов можно экспрессно проводить с использованием диаграмм по соотношению Al₂O₃–SiO₂ (см. фиг. 3 а) или по содержанию в них Al₂O₃ (см. фиг. 3 б) с относительной погрешностью около 10-15%.

Изменением режима дробления целесообразно уменьшить долю пылевидной фракции для улучшения обогащения и повышения выхода товарной продукции.

Выполнению работ способствовали сотрудники лабораторий Института минералогии УрО РАН Е.И. Чурин, В.А. Котляров, Е.В. Зорина, Л.Ф. Баженова, а также сотрудники Вишневогорского ГОКа – А.И. Коршиков, Н.П. Гребенщикова, А.А. Феськов. Авторы глубоко признательны всем коллегам по работе.

Работа выполнена по проекту ФЦП «Интеграция» № Э0364/729.

Литература

1. **Амеландов А.С.** Перспективы применения уральских миаскитов в стеклопроизводстве // Изв. Главн. Геол.-развед. Управл., 1931. Т. 50. Вып. 24. С. 1-4.
2. **Ахлюстин В.Е.** Отчет о результатах оценочных и разведочных работ 1994-2000 гг. на Вишневогорском месторождении нефелин-полевошпатового сырья в пределах Центрального Вишневогорского массива миаскитов. Вишневогорск, 2000.
3. **Жилин А.И.** Об использовании уральских горных пород в стеклоизделии // Керамика и стекло, 1930. № 7-8. С. 353-356.
4. **Карпинский А.П.** О северном продолжении Ильменских гор и его геологическом строении // Зап. Акад. Наук, 1891. Т. 66. С. 48.
5. **Кононова В.А.** Месторождения нефелиновых сиенитов Канады и Норвегии // Нефелиновое сырье. М: Наука, 1977. С. 152-157.

6. **Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С. и др.** Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 274 с.

7. **Менге И.** Геогностические наблюдения в окрестностях Миасского завода // Горн. ж., 1826. Ч. 4. Кн. 10. С. 9-20.

8. **Попов А.С.** О применении русского полевого шпата и элеолита // Стеклозаводчик, 1916. № 6. С. 5-7.

9. **Попова В.И., Попов В.А., Чурин Е.И., Ершова А.А., Низовцева А.В.** Железистость биотита в породах Вишневогорского месторождения нефелин-полевошпатового сырья // Минералогия Урала-2003. Матер. IV Всеросс. совещ. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. Т. 2. С. 137-140.

10. **Роненсон Б.М.** Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения / Геология м-ний редких элементов. Вып. 28. М.: Недра, 1966. 173 с.

11. **Роненсон Б.М., Левин В.Я., Баженов А.Г.** Палингенно-метасоматические образования северной части ильменогорского щелочного комплекса // Щелочные породы и гранитоиды Южного Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. С. 3-30.

12. **Фоминых В.Г., Свяжин Н.В.** О составе акцессорных магнетитов и титаномагнетитов щелочных пород Среднего Урала // Докл. АН СССР, 1964. Т. 155. № 5. С. 1088-1090.

13. **Rose G.** Ueber die mineralogische und geognostische Beschaffenheit des Ilmengebirges // Annalen der Physik und Chemie. Leipzig, 1839. Bd. 47. S. 373-384.