

ISSN 2658-3208

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

**ГОРНОГО ДЕЛА**



**№1(10)**

**МАГНИТОГОРСК 2021**



## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОГО ДЕЛА

№1 (10) март 2021 г.

Научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

Основан  
в 2016 году

Выходит  
4 раза в год

### О журнале

Научно-технический журнал содержит публикации по результатам теоретических, экспериментальных и научных исследований в разных областях горного дела.

Предназначен для специалистов в области геологии, маркшейдерского дела и геометрии недр, геотехнологии (подземной, открытой, строительной), обогащения полезных ископаемых. Может быть полезен магистрам, аспирантам, студентам старших курсов соответствующих специальностей.

**Основные направления журнала:** горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр, геотехнология (подземная, открытая и строительная), горные машины, обогащение полезных ископаемых.

### Редакционная коллегия

**Гавришев Сергей Евгеньевич** – председатель редакционной коллегии, проф., д-р техн. наук (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»); г. Магнитогорск, Россия;

**Галиев Сейтгали Жолдасович** – член-корреспондент НАН РК, проф., д-р техн. наук, заместитель председателя Правления АО «Казахстанский институт развития индустрии», г. Караганда, Казахстан;

**Голик Владимир Иванович** – проф., д-р техн. наук (ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»), г. Владикавказ, Россия;

**Горбатова Елена Александровна** – доц., д-р геол.-минерал. наук (ФГУ «ВИМС»), г. Москва, Россия;

**Калмыков Вячеслав Николаевич** – проф., д-р техн. наук (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), г. Магнитогорск, Россия;

**Пыталев Иван Алексеевич** – действительный член Академии горных наук, проф., д-р техн. наук (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»); г. Магнитогорск, Россия;

**Шамшиев Орунбай Шамшиевич** – проф., д-р геол.-минерал. наук, директор КГТУ им. И. Раззакова, г. Кызыл-Кия, Кыргызстан.

### Контакты

#### Главный редактор:

Орехова Наталья Николаевна - доц., д-р техн. наук  
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), тел.: (3519) 29-85-55

#### Заместитель главного редактора:

Романько Елена Александровна – доц., канд. техн. наук  
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), тел.: (3519) 29-85-40

#### Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Тел.: (3519) 29-85-40. E-mail:  
[mdig@magtu.ru](mailto:mdig@magtu.ru)

**Адрес издателя:** 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

**Адрес типографии:** 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии

Подписано к печати 28.04.2021. Заказ 110. Тираж 100 экз. Цена свободная.

16+, в соответствии с Федеральным Законом от 29.12.10. №436-ФЗ.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР**

- Горбатова Е.А., Кривошеков Н.Н., Шувалова Ю.Н., Гришин И.А.** 3  
Анализ минералого-технологических характеристик хромовых руд с позиции их  
дальнейшего обогащения

### **ГЕОТЕХНОЛОГИЯ (ПОДЗЕМНАЯ, ОТКРЫТАЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ)**

- Гапонова И.В.** 14  
Основные проектные решения разработки месторождения песчано-гравийных смесей  
«Раннее»

- Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю.** 24  
Влияние погодных условий на работоспособность карьерного экскаватора ЭКГ-32Р

### **ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

- Гришин И.А.** 31  
Исследование существующих методов и технических решений в области  
непрерывного контроля элементного состава сыпучего материала в потоке

### **АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ**

- Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А., Александрова Т.Н.** 38  
Агломерационно-сорбционное извлечение золота

УДК 549

## АНАЛИЗ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРОМОВЫХ РУД С ПОЗИЦИИ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ОБОГАЩЕНИЯ

Горбатова Е.А., Кривошеков Н.Н., Шувалова Ю.Н., Гришин И.А.

**Аннотация:** Целенаправленные опережающие минералогические исследования сплошной хромовой руды позволили установить ее текстурно-структурные особенности, минеральный состав, видовую разновидность хромшпинелида, а также физические свойства минеральных сростков методами технологической минералогии. Такой подход разрешил определить поведение минеральных сростков и индивидов в технологических процессах и рекомендовать в качестве основного метода обогащения руд гравитационный.

**Ключевые слова:** хромовые руды, технологические свойства, минералого-аналитические методы, обогатимость, технологическая минералогия.

### Актуальность

Для рационального использования хромовых руд и создания эффективной технологии их обогащения целесообразно применение системы управления качеством добываемого сырья, основным элементом которой является определение возможности предобогащения (радиометрическая сепарация) и (или) разделения руды в тяжелых суспензиях. Выбор дальнейших способов переработки руд традиционными методами глубокого обогащения (гравитации, магнитной сепарации, флотации) проводится с учетом технологических возможностей и экономической эффективности [1].

Возможность применения методов предобогащения и традиционных методов глубокого обогащения хромовых руд определяется их вещественным составом и степенью контрастности, проявляющейся на разных уровнях организации минерального вещества: минеральные агрегаты → типы сростаний → индивиды [2]. На уровне минеральных агрегатов контрастностью является степень неравномерности распределения рудного минерала в силикатной массе, установленная по элементарным объемам руды. На уровне типов сростаний контрастность проявляется в различиях физических свойств, контактирующих рудных и нерудных минералов. На уровне индивида контрастность выражается в изменчивости его морфологии, гранулометрии, элементного и фазового составов.

Целью работы является анализ минералого-технологических характеристик хромовых руд с позиции их дальнейшего обогащения.

### Методы исследования

Лабораторные испытания проб хромовых руд сопровождаются целенаправленными опережающими минералогическими исследованиями, сконцентрированными на изучение структурно-текстурных особенностей руд, их химического и минерального составов, а также свойств отдельных минеральных сростков, определяющих их поведение в технологических процессах с учетом характера раскрытия сростаний в продуктах классификации и обогащения [3].

Анализ методических подходов к изучению хромовых руд, сопровождающих технологические испытания малообъемных проб, позволил выделить основные этапы и последовательность минералогических исследований, включающих следующие виды работ:

- макроскопическое изучение руды с выявлением текстурных и макроструктурных особенностей;
- микроскопическое изучение руды с определением общих особенностей минерального состава руды, ее микроструктуры, морфологии и гранулярного состава минералов, слагающих руду;

- проведение количественного фазового анализа руды;
- выявление гетерогенности рудных минералов по химическому составу и строению;
- анализ характера распределения минеральных сростков в продуктах классификации;
- изучение физических свойств минеральных сростков.

В изучении хромовых руд использовался комплекс минералого-аналитических методов, включающий оптическую микроскопию (оптико-петрографический и минераграфический методы), количественный рентгенографический анализ, рентгеноспектральный микроанализ, позволяющий получить полную информацию об их минеральном составе и структурно-текстурных особенностях. Минералогические работы регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по методам минералогических исследований: МУ НСОММИ №31 «Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ»; МР НСОММИ №177 «Прогноз технологических свойств минералогическими методами на ранних стадиях геологоразведочных работ. Хромовые руды»; МР НСОММИ №111 «Петрографический анализ магматических, метаморфических и осадочных горных пород»; МР НСОММИ №162 «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб»; МР НСОММИ №191 «Рентгенографический количественный фазовый анализ с использованием метода внутреннего стандарта»; МР НСОММИ №194 «Минераграфическое изучение руд» [5].

#### **Объект исследования**

Малая технологическая проба сложена сплошной хромовой рудой с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , равном 33,00%.

#### **Результаты исследования исходной руды**

##### *Текстурно-структурные характеристики хромовой руды*

Сплошной хромовой рудой, характеризующейся массивным сложением.

Массивная текстура определяется равномерным распределением хромшпинелидов и силикатов во всем объеме руды без их видимой ориентировки. Однородность нарушается сгущением силикатных минералов с образованием элементов пятнистой текстуры, что обусловлено включениями серпентинизированного дунита (рис. 1). Однородное сложение хромовой руды предопределяет неэффективность ее предобогащения методом радиометрической сепарации.

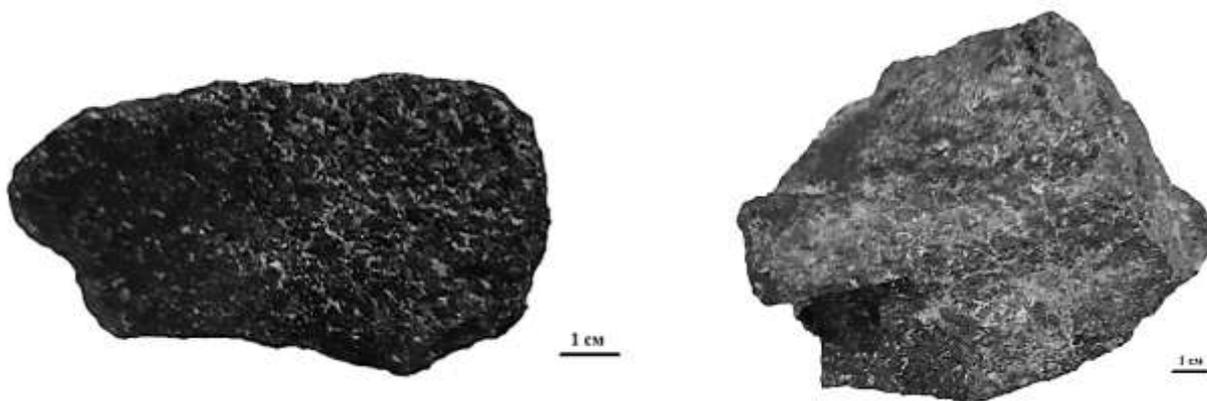


Рис.1. Внешний вид массивной руды с элементами пятнистой текстуры

Структура руды неравномерно-зернистая, от тонко- до среднезернистой с преобладанием мелкозернистой составляющей. Анализ распределения минеральных агрегатов/зерен хромшпинелидов по классам крупности указывает на возможность их раскрытия при дроблении до класса крупности -2 мм (рис. 2).



Рис. 2. Гранулярный состав зерен/агрегатов хромшпинелидов по данным оптико-геометрического анализа, мас. %

Многостадийность образования хромовой руды сопровождается совместным изменением ее рудной и силикатной составляющих, что приводит к формированию потенциальных технологических свойств руды. Для хромовых руд преобладающими являются **рудные** и **силикатно-рудные** минеральные ассоциации.

Рудные микроагрегаты характеризуются гипидиоморфно-зернистым строением (рис. 3). Структуры дробления фиксируются в проявлении трещиноватости зерен и минеральных агрегатов хромшпинелидов. Структуры замещения связаны с образованием хромшпинелидов, богатых железом за счет более ранних магнезиально-алюминиевых разновидностей.

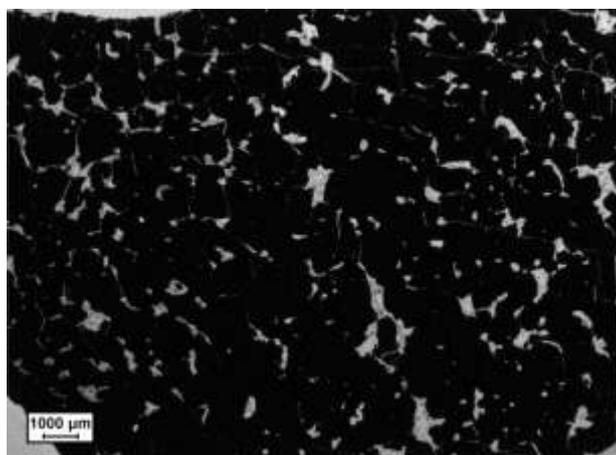


Рис. 3. Гипидиоморфно-зернистая структура хромовой руды: черное – хромшпинелиды, светлое – минералы группы серпентина. Прозрачный шлиф.

Микростроение силикатно-рудных агрегатов выражается в выполнении пространства между зернами хромшпинелидов и полостей трещин силикатами – минералами группы серпентина и хлоритом. Такой процесс сопровождается обрастанием зерен хромшпинелидов серпентином, а также чешуйками хлорита. Для более позднего хлорита характерна перекристаллизация с образованием более крупных чешуек – «хлоритовых рубашек». В выделениях хромшпинелидов фиксируются пойкилитовые включения силикатов.

*Минеральный состав*

Комплексом минералого-аналитических методов, включающим рентгенографический количественный фазовый анализ и методы оптической микроскопии, установлено, что основными минералами, слагающими руду малой технологической пробы, являются хромшпинелиды (91%), минералы группы серпентина, хлорит, в подчиненном количестве фиксируется пирит.

*Хромшпинелиды* образуют минеральные агрегаты гипидиоморфно-зернистого строения. Индивидуализированные зерна в шлифах наблюдаются в подчиненном количестве.

Минеральные агрегаты/зерна хромшпинелида подвержены динамическому воздействию с образованием многочисленных трещин, проявляющихся по направлению спайности и ослабленным зонам. Фиксируется тонкая и грубая трещиноватость с образованием сегментов (обломков) разной формы и величины (рис. 4).

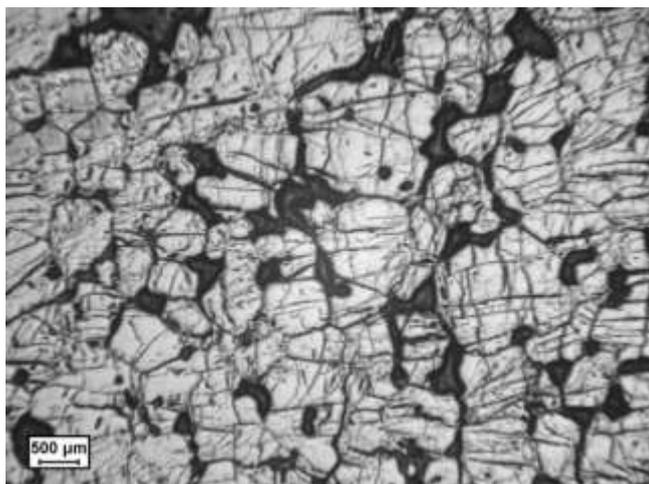


Рис. 4. Катаклазированные зерна хромшпинелида. Отраженный свет, николи параллельны

По данным оптико-геометрического метода обломки катаклазированных зерен/агрегатов хромшпинелидов имеют удлиненный облик, реже изометричный, что подтверждается средним значением отношения длины к ширине, равным 2,13 (табл. 1). Размер обломков зерен и агрегатов хромшпинелидов изменяется от 0,004 до 0,915 мм.

Таблица 1  
Морфометрические характеристики обломков катаклазированных зерен хромшпинелидов

Размерность, мм			Изрезанность	Удлинение
минимальная	средняя	максимальная		
0,004	0,105	0,915	0,57	2,13

Распределение обломков катаклазированных зерен/агрегатов хромшпинелидов в рамках гранулометрического спектра подчиняется закону Гаусса с максимумом (54,21%) в классе крупности  $-0,5+0,25$  мм (рис. 5). Анализ гранулярного состава обломков, выполненный оптико-геометрическим методом, позволяет утверждать, что раскрытие рудных минералов должно прослеживаться в классах крупности  $-1+0$  мм при выходе дробленого материала данного класса 15,32%.

Гетерогенность зерен/агрегатов хромшпинелидов определяется их фазовой и структурной неоднородностью, выраженной присутствием двух разновидностей хромшпинелидов (1 и 2) и нарушенным строением. По данным рентгенографического количественного фазового анализа содержание хромшпинелида-1 составляет 75%, а

хромшпинелида-2 – 16%. Хромшпинелид-1 слагает центральную часть (ядро) зерна, хромшпинелид-2 развивается по периферии зерен, трещинам, ослабленным и легко проницаемым зонам.

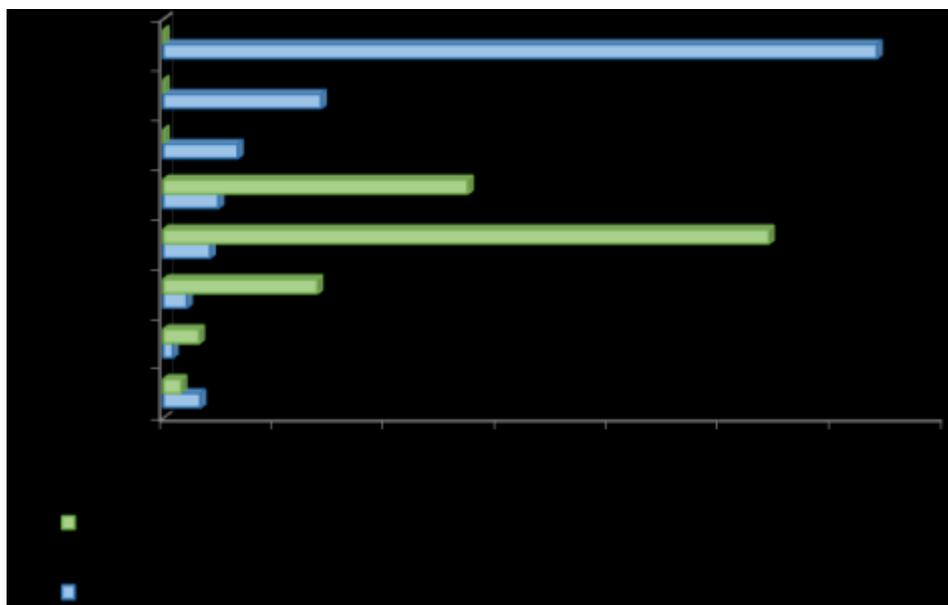


Рис. 5. Распределение обломков катаклазированных зерен/агрегатов хромшпинелидов по классам крупности (гранулярный состав по данным оптико-геометрического метода)

Разновидности хромшпинелидов хорошо фиксируются во вторичных электронах по характеру распределения химических элементов в зернах (рис. 6). Так, по периферии зерен или вдоль трещин четко прослеживаются зоны с повышенной атомной плотностью (светлый тон) относительно их центральных частей с более низкой атомной плотностью (серый цвет).

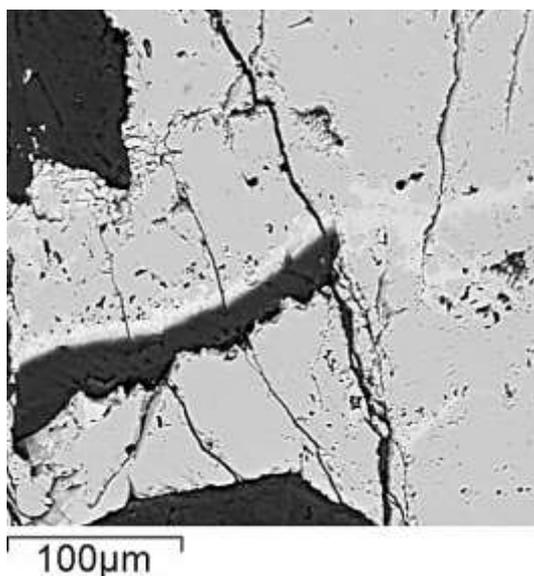


Рис. 6. Развитие хромшпинелида-2 (белое) по контурам и ослабленным зонам хромшпинелида-1 (светло-серое). BSE

Химический состав хромшпинелида-1 характеризуется небольшой вариацией базовых компонентов MgO (12,55 – 13,13 %), FeO (13,91 – 12,98%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12,25 – 12,74%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,50 – 4,20%) и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (57,94 – 58,21%). Наблюдается присутствие примесных компонентов

MnO, CoO, NiO, CuO, ZnO, TiO<sub>2</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (табл. 2). Хромшпинелид-2 по химическому составу отличается от первой разновидности повышенным содержанием FeO (16,86 – 17,60%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,36 – 8,17%) и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (58,06 – 62,38%). Отмечается вариация примесных компонентов MnO, CoO, NiO и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав хромшпинелидов, мас. % (по данным РСМА)

Компоненты	Содержание, мас. %					
	хромшпинелида-1			хромшпинелида-2		
MgO	12,58	12,58	12,98	8,98	9,63	9,85
MnO	0,42	0,42	0,47	0,34	0,30	0,42
FeO	14,45	14,45	14,06	16,86	17,60	16,92
CoO	0,05	0,05	0,21	0,08	0,35	0,19
NiO	н/о	н/о	0,22	0,08	0,16	0,10
CuO	0,26	0,26	0,06	н/о	н/о	0,04
ZnO	н/о	н/о	н/о	0,04	н/о	н/о
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,50	2,50	3,30	7,36	7,70	8,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,55	12,55	12,74	3,32	2,62	2,34
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,22	0,23	0,33	0,37	0,35
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,09	0,14	н/о	0,09	0,20
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,94	57,94	57,97	58,06	63,26	62,38

Согласно классификации Н.В. Павлова, по соотношению трехвалентных катионов хромшпинелид-1 является алюмохромитом, а хромшпинелид-2 – субферрихромитом (табл. 3).

Таблица 3

Кристаллохимические формулы хромшпинелидов

Хромшпинелид	Формула
1	$(\text{Mn}_{0,01}\text{Cu}_{0,01}\text{Fe}_{0,39}\text{Mg}_{0,59})(\text{Ti}_{0,01}\text{Fe}_{0,06}\text{Al}_{0,47}\text{Cr}_{1,46})\text{O}_4$
	$(\text{Mn}_{0,01}\text{Cu}_{0,01}\text{Fe}_{0,38}\text{Mg}_{0,60})(\text{Ti}_{0,01}\text{Fe}_{0,06}\text{Al}_{0,47}\text{Cr}_{1,46})\text{O}_4$
	$(\text{Co}_{0,01}\text{Ni}_{0,01}\text{Mn}_{0,01}\text{Fe}_{0,37}\text{Mg}_{0,60})(\text{Ti}_{0,01}\text{Fe}_{0,08}\text{Al}_{0,47}\text{Cr}_{1,44})\text{O}_4$
2	$(\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,48}\text{Fe}_{0,51})(\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{0,14}\text{Fe}_{0,21}\text{Cr}_{1,64})\text{O}_4$
	$(\text{Co}_{0,01}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,48}\text{Fe}_{0,50})(\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{0,11}\text{Fe}_{0,20}\text{Cr}_{1,68})\text{O}_4$
	$(\text{Ni}_{0,01}\text{Co}_{0,01}\text{Mn}_{0,01}\text{Mg}_{0,48}\text{Fe}_{0,49})(\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{0,10}\text{Fe}_{0,21}\text{Cr}_{1,68})\text{O}_4$

**Пирит** образует единичные зерна и ассоциирует с силикатной составляющей большей частью с минералами группы серпентина. Размер зерен не превышает 0,050 мм. Характер распределения зерен пирита равномерно рассредоточенный, отсутствуют элементы сгущения.

**Минералы группы серпентина и хлорит** встречаются в подчиненном количестве и выполняют тонкие прожилки, секущие хромовую руду.

**Хлорит.** По оптическим характеристикам выделяются две разновидности хлорита - коричневатого-серого (1) и василькового (2) цвета. Хлорит-1 преобладает в пробе, образуя отдельные индивидуализированные чешуйки размером до 0,2 мм и минеральные агрегаты, выполняющие полости трещин (рис. 7, а). Хлорит-2, как более поздний минерал, присутствует в подчиненном количестве, оконтуривая тонкой каймой хлорит-1 и частично выполняя полости трещин (рис. 7, б).

Чешуйки хлорита-1, обрастая зерна хромшпинелида, имеют разную направленность роста. Они располагаются перпендикулярно или параллельно относительно зерен хромшпинелида. Параллельное расположение чешуек хлорита приводит к обволакиванию

зерен хромшпинелида (рис.7, в), тем самым частично блокируя их магнитные свойства. Перпендикулярное расположение чешуек хлорита, вероятно, усложняет раскрытие рудных и нерудных минералов (рис. 7, г).

По данным рентгеноспектрального микроанализа хлорит-1 можно отнести к хромсодержащей разновидности – кеммерериту, где количество  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  достигает 4,28%.

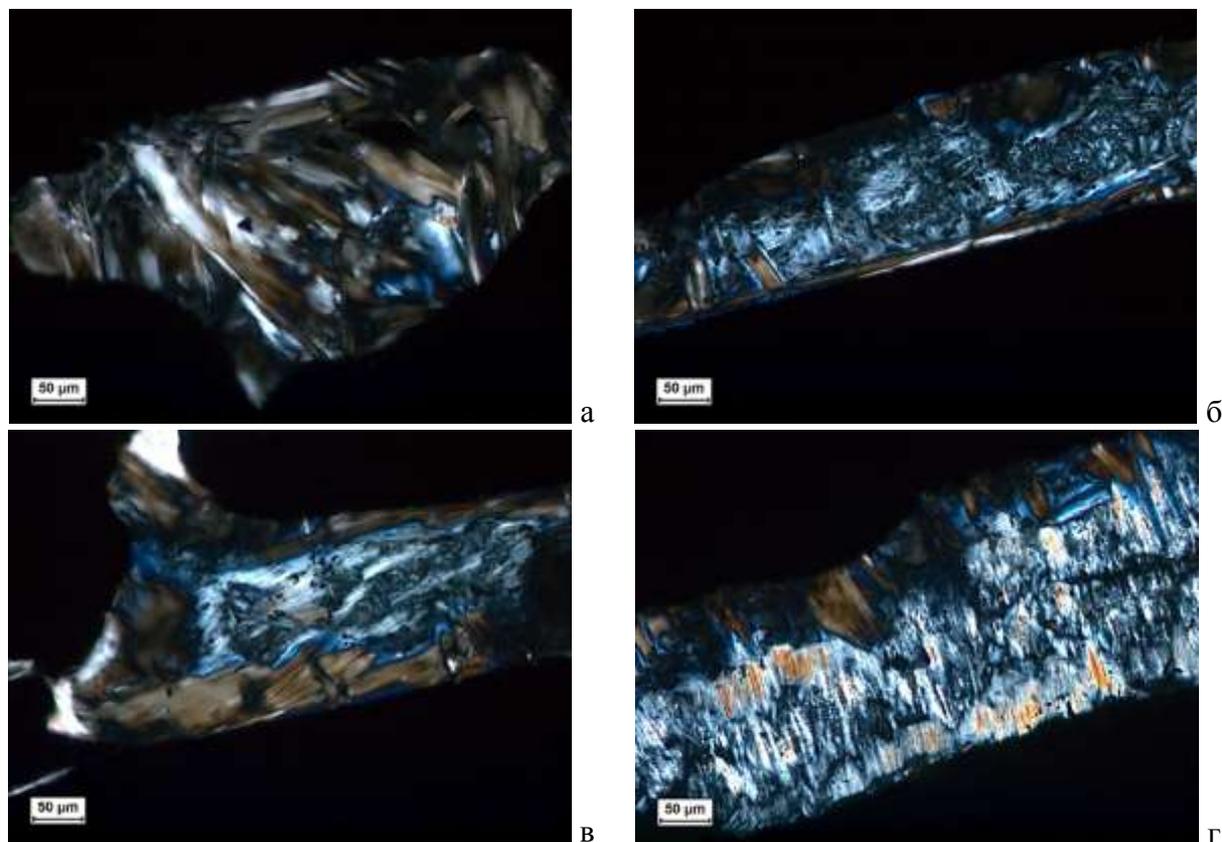


Рис. 7. Минеральные агрегаты хлорита-1 (а) и хлорита-2 (б), выполняющие полости трещин, параллельное (в) и перпендикулярное (г) расположение чешуек хлорита. Проходящий свет, николи скрещены

В изучаемых хромовых рудах *минералы группы серпентинов* совместно выполняют полости трещин и промежутки между обломками зерен хромшпинелида, тем самым выступая в качестве цемента. Шнуровидные выделения серпентина разбивают замещенные зерна оливина на отдельные мелкие блоки, тем самым образуя реликты петельчатой или сетчатой структуры.

Волокнистая разновидность серпентина (хризотил-асбест) образует прожилки выполняя полости трещин в рудных микроагрегатах и участками оконтуривают зерна хромшпинелидов (рис. 8). Волокна (фибриллы) расположены перпендикулярно стенкам прожилка, формируя его поперечно-волокистую разновидность. Длина фибрилл не превышает 0,1 мм.

По данным рентгеноспектрального микроанализа минералы группы серпентина содержат не более 0,5%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Минералы, слагающие силикатную и рудную части аподунитового серпентинита, отличаются физико-механическими свойствами – твердостью, спайностью и ударной вязкостью, что предопределяет их поведение в процессе рудоподготовки. Силикатные минералы группы серпентинита обладают высокой ударной вязкостью и низкой твердостью, что приводит к их переизмельчению, более раннему выделению свободных зерен и образованию примазок и корочек, обволакивающих зерна рудных минералов.

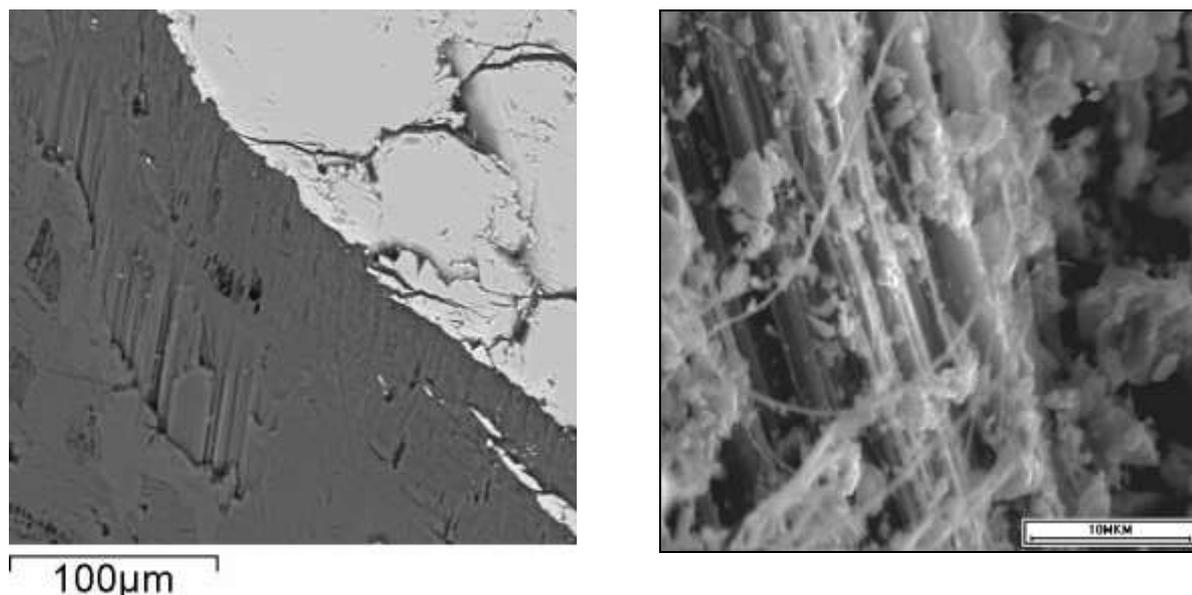


Рис. 8. Прожилки хризотил-асбеста, окаймляющие зерно хромшпинелида. ВЕС

#### Результаты исследования продуктов дробления

Раскрытие рудных и нерудных минералов анализировалось в классифицированной дробленой руде путем анализа распределения разных типов минеральных сростков в классах крупности - 10+ 5; -5+2; -2+1; -1+0,5; - 0,5+0,25; -0,25+0,16; - 0,16+0,1; -0,1+0,071; - 0,071+0,044 мм. По содержанию рудного минерала в каждом классе были выделены и количественно оценены пять основных типов минеральных сростков: свободные рудные зерна (91-100%); богатые сростки (71-90%); рядовые сростки (31-70%); бедные сростки (6-30%); свободные нерудные зерна (0-5%).

Анализ дробленого материала показал, что классы крупности -10,0+0,25 мм сложены, в основном, рудными микроагрегатами, включая свободные рудные зерна, богатые и рядовые минеральные сростки. Начиная с класса крупности -0,25+0,16 мм, наблюдается раскрытие минеральных сростков с высвобождением нерудной составляющей, что хорошо прослеживается на рис. 9.

Морфология агрегатов свободных рудных зерен и минеральных сростков обусловлена характером катаклаза хромовых руд. Нерудные минералы в таких типах сростков встречаются в виде корочек и чешуйчатых выделений. Рядовые и бедные минеральные сростки имеют неоднородное строение с неравномерным распределением как рудных, так и нерудных минералов. Следует отметить, что степень неоднородности повышается с уменьшением класса крупности. Форма нерудных свободных зерен определяется особенностями морфологии минералов группы серпентина и хлорита. В тонких классах хорошо прослеживаются чешуйчатые и пластинчатые формы выделения.

В табл. 4, 5 и на рис. 9 продемонстрировано раскрытие рудных и нерудных минералов в процессе дробления пробы хромовой руды до крупности -10 мм.

Раскрытие свободных рудных зерен уже фиксируется в классе крупности -10+5 мм и особо значительно в -0,5+0 мм, в то время как раскрытие нерудной составляющей идет достаточно неравномерно до класса крупности -0,25+0,16 мм, где наблюдается резкий скачок и постепенное нарастание до класса крупности -0,071+0,045 мм.

Общая направленность раскрытия рудных и нерудных свободных зерен отражена на тройной диаграмме «минеральные сростки – свободные нерудные зерна – свободные рудные зерна» (см. рис. 9). Процесс раскрытия прослеживается вдоль прямой СР, что свидетельствует о преобладании рудной составляющей. В классах крупности -10+5 мм, -5+2 мм, -2+1 мм и 1+0,5 мм происходит раскрытие минеральных агрегатов с выделением рудной составляющей, о чем свидетельствует расположение точек вдоль прямой СР.

Таблица 4

Раскрытие рудных и нерудных минералов по классам крупности, мас. %

Класс крупности, мм	Свободные рудные зерна	Сростки			Свободные нерудные зерна
		богатые	рядовые	бедные	
-10+5	28,04	57,63	14,33	0,00	0,00
-5+2	38,76	55,52	1,94	0,81	2,96
-2+1	40,82	50,28	7,26	0,80	0,85
-1+0,5	52,00	40,01	4,72	1,12	2,15
-0,5+0,25	78,82	10,80	4,85	1,25	4,28
-0,25+0,16	77,75	5,75	1,92	1,08	13,49
-0,16+0,1	77,92	4,31	1,94	1,09	14,74
-0,1+0,071	78,27	3,26	0,70	1,18	16,58
-0,071+0,045	70,47	1,57	0,00	0,95	27,01

Так, в классах крупности -10+5 и -1+0,5 мм дробленый материал представлен минеральными сростками (71,96 и 45,85%) и рудными свободными зернами (28,04 и 52,00%). С понижением тонины محتوا содержание рудных свободных зерен увеличивается. Процесс раскрытия минералов является эффективным ( $\eta=75\%$ ) в классах крупности -0,5+0,25, -0,25+0,16, -0,16+0,1, -0,1+0,074 и -0,074+0,044 мм, где количество минеральных сростков не превышает 16,90%.

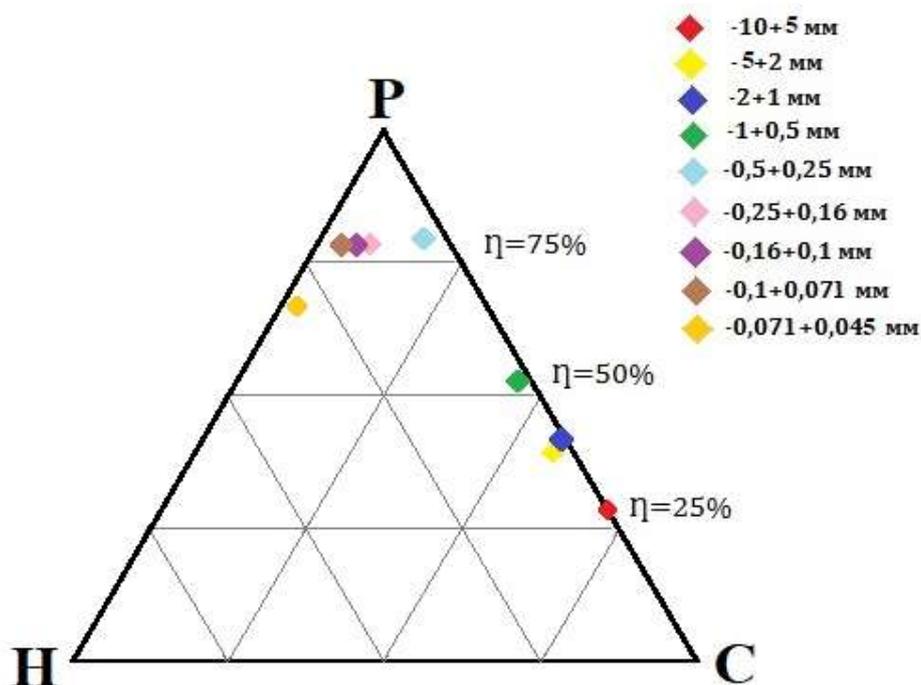


Рис. 9. Схема раскрытия рудных и нерудных минералов с учетом эффективности обогащения  $\eta$ : С – минеральные сростки, Н – свободные нерудные зерна, Р – свободные рудные зерна

Таким образом, дробленый материал хромовых руд, в основном, сложен минеральными сростками с преобладанием богатых сростков (50,57%). Свободные рудные зерна составляют 34,76%.

При анализе перспектив применения основных методов обогащения – гравитации и магнитной сепарации для переработки хромовой руды – предварительно для разных типов минеральных сростков класса крупности -2+1 мм экспериментальным путем были установлены их плотностные и магнитные характеристики.

Таблица 5

Раскрытие рудных и нерудных минералов в пробе, мас. %

Класс крупности	Выход, %	Свободные рудные зерна	Сростки			Свободные нерудные зерна
			богатые	рядовые	бедные	
-10+5	63,90	17,92	36,83	9,16	0,00	0,00
-5+2	14,12	5,47	7,84	0,27	0,12	0,42
-2+1	6,65	2,71	3,34	0,48	0,05	0,06
-1+0,5	4,92	2,56	1,97	0,23	0,05	0,11
-0,5+0,25	4,17	3,29	0,45	0,20	0,05	0,18
-0,25+0,16	0,92	0,72	0,05	0,02	0,01	0,12
-0,16+0,1	1,17	0,91	0,05	0,02	0,01	0,17
-0,1+0,071	0,83	0,65	0,03	0,01	0,01	0,14
-0,071+0,045	0,76	0,54	0,01	0,00	0,01	0,21
Итого	97,44	34,76	50,57	10,39	0,31	1,40

Примечание. Содержание рудных минералов в свободных зёрнах – 96-100%, в богатых сростках – 71-95%, в рядовых сростках – 31-70%, в бедных сростках – 6-30%, в нерудных зёрнах – 0-5%.

Плотность зерен минеральных сростков с разным содержанием рудного минерала определялась пикнометрическим методом согласно ГОСТ 5180-84 [4]. Результаты измерения позволили объединить минеральные сростки в три группы, что обусловлено разным соотношением рудной и нерудной составляющих сростков и изменчивостью минерального состава нерудной части (табл. 6). Различие в значениях плотности определяет возможность получения хромового концентрата методами гравитации.

Таблица 6

Плотность минеральных сростков

Тип сростков	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Свободные рудные зерна	4,25
Богатые сростки	4,05
Рядовые сростки	3,54
Бедные сростки	2,98
Свободные нерудные сростки	2,48

Поведение разных типов минеральных сростков класса крупности -2+1 мм в магнитном поле оценивается по величине удельной магнитной восприимчивости зерен, участвующих в процессе разделения. При этом четко просматривается зависимость магнитных свойств зерен непосредственно от их строения, минерального состава и особенно от элементного состава хромита (табл. 7).

Таблица 7

Значения удельной магнитной восприимчивости разных типов минеральных сростков

Тип сростков	$\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
Свободные рудные зерна	91
Богатые сростки	86
Рядовые сростки	77
Бедные сростки	34
Свободные нерудные сростки	19

Анализ полученных данных показывает, что значения удельной магнитной восприимчивости всех типов сростков лежат в одном диапазоне и не обеспечивают эффективности выделения хромового концентрата методами магнитной сепарации.

### Обсуждение результатов

Малая технологическая проба сформирована массивными рудами.

Комплексом минералого-аналитических методов, включающим рентгенографический количественный фазовый анализ и методы оптической микроскопии, установлено, что основными минералами, слагающими руду малой технологической пробы, являются хромшпинелиды, минералы группы серпентина, хлорит, в подчиненном количестве фиксируется пирит.

В рудах встречаются две разновидности хромшпинелида – алюмохромит и субферрихромит. Среднее содержание Cr составляет 40,2%, при этом количество Fe 17,02%.

Анализ гранулярного состава обломков, выполненный оптико-геометрическим методом, позволяет утверждать, что раскрытие рудных минералов должно прослеживаться в классах крупности менее минус 1 мм, выход данного класса при дроблении до 10 мм составляет 15,32%.

Минералогическими исследованиями установлено, что процесс раскрытия минералов является эффективным ( $\Pi=75\%$ ) в классах крупности  $-0,5+0,25$ ,  $-0,25+0,16$ ,  $-0,16+0,1$ ,  $-0,1+0,074$  и  $-0,074+0,044$  мм, где количество минеральных сростков не превышает 16,90%. Дробленный материал хромовых руд, в основном, сложен минеральными сростками с преобладанием богатых сростков (50,57%). Свободные рудные зерна составляют 34,76%.

Оценка плотности и удельной магнитной восприимчивости для разных типов сростков, полученных экспериментальным путем, показала одинаковую возможность фракционирования классов крупности менее 1 мм по плотности. Магнитный метод обогащения может быть применен только при более полном раскрытии сростков.

### Список литературы

1. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.
2. Пирогов Б.И. Системное минералого-технологическое исследование руд в связи с их обогащением. // Разведка и охрана недр. 2019. №2. С. 41-50.
3. Кузьмин В.И. Комплексование минералогических методов исследования при лабораторных испытаниях технологических проб // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья: сборник научных трудов. М.: ВИМС, 1997. С. 125 – 132.
4. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., 1985.
5. Ожогина Е.Г., Горбатова Е.А. Система управления качеством минералогических работ // Актуальные проблемы горного дела. 2017. №3. С.3-7.

### Сведения об авторах

**Горбатова Елена Александровна** – д-р геол.-минерал. наук, доц., зам. зав. минералогическим отделом Всероссийского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, E-mail: [lena\\_gorbatova@mail.ru](mailto:lena_gorbatova@mail.ru)

**Кривошеков Николай Николаевич** – ведущий сотрудник минералогического отдела Всероссийского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, E-mail: [vims-niknik@mail.ru](mailto:vims-niknik@mail.ru)

**Шувалова Юлия Николаевна** – старший научный сотрудник минералогического отдела Всероссийского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Москва, Россия, E-mail: [vims-rentgen@mail.ru](mailto:vims-rentgen@mail.ru)

**Гришин Игорь Анатольевич** – канд. техн. наук, доц, зав. кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, E-mail: [igorgri@mail.ru](mailto:igorgri@mail.ru)

УДК 622.2:553:5

## ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ «РАННЕЕ»

Гапонова И.В.

**Аннотация.** В статье представлены основные технические решения для реализации мероприятий по комплексному освоению участка недр «Раннее». Дана геологическая характеристика месторождения. Приведен порядок разработки месторождения и рассчитаны параметры карьера на конец отработки. На основании анализа основных факторов, определяющих структуру и содержание мониторинга обоснована структура экологического мониторинга при добыче песчано-гравийных смесей на месторождении «Раннее». Предложены природоохранные мероприятия для снижения негативного воздействия разработки месторождения открытым способом на окружающую среду.

**Ключевые слова:** песчано-гравийные смеси, экологический мониторинг, карьер, отвал, гидромеханизация.

### Введение

В современных условиях требования к проектированию карьеров должны включать: оценку эффективности разработки месторождения полезных ископаемых; минимизацию негативного воздействия выработки на окружающую среду; рекультивацию как самого карьера, так и прилегающих территорий, а также варианты дальнейшего использования земель, нарушенных горными работами. Гидромеханизированный способ наиболее применим при добыче общераспространенных полезных ископаемых, в качестве основных преимуществ данного способа следует отметить следующее:

1. Гидромеханизация является одним из наиболее прогрессивных и эффективных способов производства земляных работ. Эффективность данного способа заключается в едином технологическом процессе, включающем в себя: выемку, транспортирование, обогащение и складирование полезного ископаемого.

2. Стоимость и трудозатраты на проведение гидромеханизированных работ меньше по сравнению с традиционным способом (с использованием экскаватора).

3. Простота по устройству и эксплуатации землесосного оборудования.

4. Более низкая энергоемкость с пересчетом на условное топливо.

5. Возможность разработки как обводненных карьеров, так и сухих (гидромониторно-землесосным способом) и, следовательно, возможность разработки выемок крупных котлованов, каналов без осушительных и водопонизительных работ.

Примером использования данного способа добычи является месторождение песчано-гравийных смесей «Раннее».

### Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Месторождение песчано-гравийной смеси «Раннее» расположено в Ташлинском районе Оренбургской области вблизи села Раннее на землях колхоза им. Горького. С севера, запада и юга месторождение окружено старичными озерами. Село Раннее и райцентр Ташла соединены грейдерной дорогой, расстояние между ними равно 42 км. Ближайшая железнодорожная станция Сорочинск расположена в 120 км севернее месторождения. Станция соединена с селом Ташла асфальтированной дорогой.

Поверхность месторождения ровная, отмечаются лишь пологие понижения глубиной до 1-2 м. Абсолютные отметки рельефа местности изменяются в пределах 46-48 м, а отметка уреза воды старичных озер составляет 45,4 м. Район месторождения входит в пределы Прикаспийской низменности.

Гидрографическую сеть района образует р.Урал, протекающая южнее и юго-западнее месторождения на расстоянии не ближе 1,0 км. Само месторождение расположено в пределах высокой поймы реки. Высота уступа поймы над урезом воды р.Урал достигает 6-8 м. Старичные озера, окружающие месторождение, в летнее время не имеют связи с рекой, участки пересыхают, образуя болота. Во время весенних паводков пойма реки большей частью покрывается водой. Высота подъема воды достигает 4-8 м над меженью р.Урал.

Покровные отложения представлены почвенным слоем, песками и глинами. Мощность покровных отложений (вскрыши) изменяется в пределах 0,3-2,5 м, обычно - от 1,3 до 1,8 м, средняя по подсчетным блокам колеблется от 1,5 до 1,6 м. Коэффициент вскрыши изменяется по блокам от 0,12 до 0,14.

Мощность песков и ПГС в полезной толще изменяется в обратной зависимости. В участках максимальной мощности песков отмечается минимальная мощность ПГС, при относительно выдержанной мощности полезной толщи в пределах месторождения. Все изменения по мощности слоев и содержанию вредных примесей носят плавный характер, без определенной закономерности как по разрезу, так и по площади месторождения.

В полезной толще природные пески слагают верхнюю часть полезной толщи, песчано-гравийные отложения – нижнюю. По объему природные пески составляют третью часть от общего объема полезного ископаемого. В связи с тем, что полезная толща представлена природными песками и песчано-гравийными смесями со значительным содержанием (от 74,2 до 88,4%) песка-отсева, основную массу сырья при добыче будет представлять песчаная фракция, содержание которой в общей массе полезного ископаемого составит 88,7%, а гравия – 11,3%.

Зерновой состав песка-отсева в смеси с природным песком в основном соответствуют требованиям ГОСТ 10268-80 применительно к мелкому заполнителю для приготовления бетона марки до 300 (табл. 1). Незначительное превышение (на 1,9%) значения прохода через сито №016 будет устранено за счет отмыва глинистых и пылевидных частиц при добыче сырья гидромеханизированным способом. При отмыве этих частиц в количестве 50% содержание их снизится с 4,88 до 2,44%.

Таблица 1  
Сравнение зернового состава песков месторождения с показателями ГОСТ 10268-80

Размер отверстий контрольного сита, мм	Полные остатки на контрольных ситах, % по массе для бетона		
	По ГОСТ 10268-80 (для всех видов конструкций и изделий, кроме труб)	Средневзвешенные показатели по месторождению	
		Песок-отсев	Смесь природного песка и песка-отсева
2,5	0-20	7,73	5,69
1,25	5-45	16,56	12,27
0,63	20-70	27,97	20,94
0,315	35-90	56,35	47,05
0,14 (0,16)	90-100	90,5	88,13
Проход через сито 014 (0,16)	10-0	9,5	11,87
Модуль крупности	1,5-3,25	1,99	1,74

По данным технологических испытаний песчано-гравийные смеси отвечают требованиям к сырью и строительным материалам и определяются следующими ГОСТ(ами): ГОСТ 8268-82 «Гравий для строительных работ. Технические условия»; ГОСТ 8736-85 «Песок для строительных работ. Технические условия»; ГОСТ 10268-80 «Бетон тяжелый. Технические требования к заполнителям»; ГОСТ 25607-83 «Материалы нерудные для

щебеночных и гравийных оснований и покрытий автомобильных дорог. Технические условия»; ГОСТ 23735-79 «Смеси песчано-гравийные для строительных работ. Технические условия».

Предусматривается использование песчано-гравийных смесей потребителем в качестве сырья для приготовления бетона марки до «300», сооружение оснований автомобильных дорог I и II категорий и как материал для строительных работ.

По состоянию на 01.01.2021 г. территориальным балансом запасов общераспространенных полезных ископаемых учтены запасы песчано-гравийных смесей месторождения «Раннее» по категориям В+С<sub>1</sub> в количестве 1999 тыс.м<sup>3</sup>, в том числе: по категории В – 493 тыс.м<sup>3</sup>, по категории С<sub>1</sub> – 1506 тыс.м<sup>3</sup>.

На территории месторождения «Раннее» в настоящее время горные работы не ведутся. Капитальных траншей проектом не предусматривается. Рабочие вскрышные уступы в процессе их отработки вскрываются временными съездами с продольным уклоном до 80%.

Принятые элементы системы разработки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Элементы и параметры системы разработки

Элементы системы разработки	Обозначения	Значения
Минимальная ширина рабочей площадки, м	Ш <sub>р.п.</sub>	40,2
Ширина заходки экскаватора, м	А	30,7
Ширина призмы обрушения, м	П <sub>б.п.</sub>	1,14
Высота рабочего уступа, м, в т.ч.:	Н	до 14,3
- надводного уступа, м, в т.ч.:	h	до 3,8
вскрышного уступа		до 1,8
добычного уступа		до 2,3
- подводного уступа, м	h <sub>1</sub>	до 10,5
Рабочий угол уступа, град	α	35
Устойчивый угол уступа, град	β	27
Радиус черпания на уровне стояния, м	R <sub>ч.у</sub>	20,47
Радиус разгрузки, м	R <sub>р</sub>	13,57
Минимальный радиус разворота автосамосвала, м	R <sub>а</sub>	9,0
Ширина предохранительного вала, м	П <sub>в</sub>	1,7
Ширина проезжей части, м	П <sub>п</sub>	7,5
Ширина полосы для обочины, м	П' <sub>0</sub>	0,5

Вскрытие добычных горизонтов будет произведено внутренними наклонными съездами по мере отработки запасов месторождения согласно календарному плану добычных работ. Объемы горно-капитальных работ приведены в табл.3.

Таблица 3

Объем горно-капитальных работ

Наименование видов работ	Объем, тыс. м <sup>3</sup>
Удаление почвенного грунта, в том числе:	22,17
- с территории, подлежащей отработке карьером	10,89
- с площадей, предназначенных под карты намыва, отвал, водоотводную канаву и с площади автодорог	11,28
Удаление вскрышных пород	78,8
Зачистка кровли пласта полезного ископаемого	7,4
Подготовка площадки карт намыва ПГС, отм. +47,0 м (2021 г.)	6,4
Формирование водоотводной канавы (2021 г.)	1,4

В первый год предусматривается добыча песчано-гравийных смесей механизированным способом. В этот период будут вскрыты и подготовлены к освоению обводненные запасы ПГС для добычи гидромеханизированным способом с применением

земснаряда СГТ-800Д, а также сформирован технологический пруд для последующего монтажа и пуска земснаряда. Северо-восточнее от данного пионерного котлована предусматривается планировка площадки до отметки +47,0 м с целью дальнейшего размещения на ней двух карт намыва.

В период эксплуатации карьера планируются следующие горно-подготовительные работы:

- удаление почвенного грунта с территории участка дальнейшей разработки карьера;
- зачистка кровли пласта полезного ископаемого на глубину 0,2 м;
- подготовка площадки под карты намыва песчано-гравийных смесей, отметка площадки +47,0 м (2021 г.), работы производятся аналогично удалению почвенного грунта.

В соответствии с нормами технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов минимальные размеры котлована для плавучих землесосных снарядов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Минимальные размеры котлована для плавучих земснарядов

Производительность земснаряда по воде, м <sup>3</sup> /ч	Глубина воды, м	Ширина по дну, м	Длина по дну, м
До 1300	2	20	30

Исходя из минимальных требований к пионерному котловану, для монтажа и запуска земснаряда, необходимо подготовить территорию, площадь которой по верхней бровке котлована составит не менее 0,15 га.

В первый год предусматривается формирование временного внешнего отвала вскрышных пород с дальнейшим перемещением в выработанное пространство карьера. План карьера на конец первого года эксплуатации приведен на рис. 1.

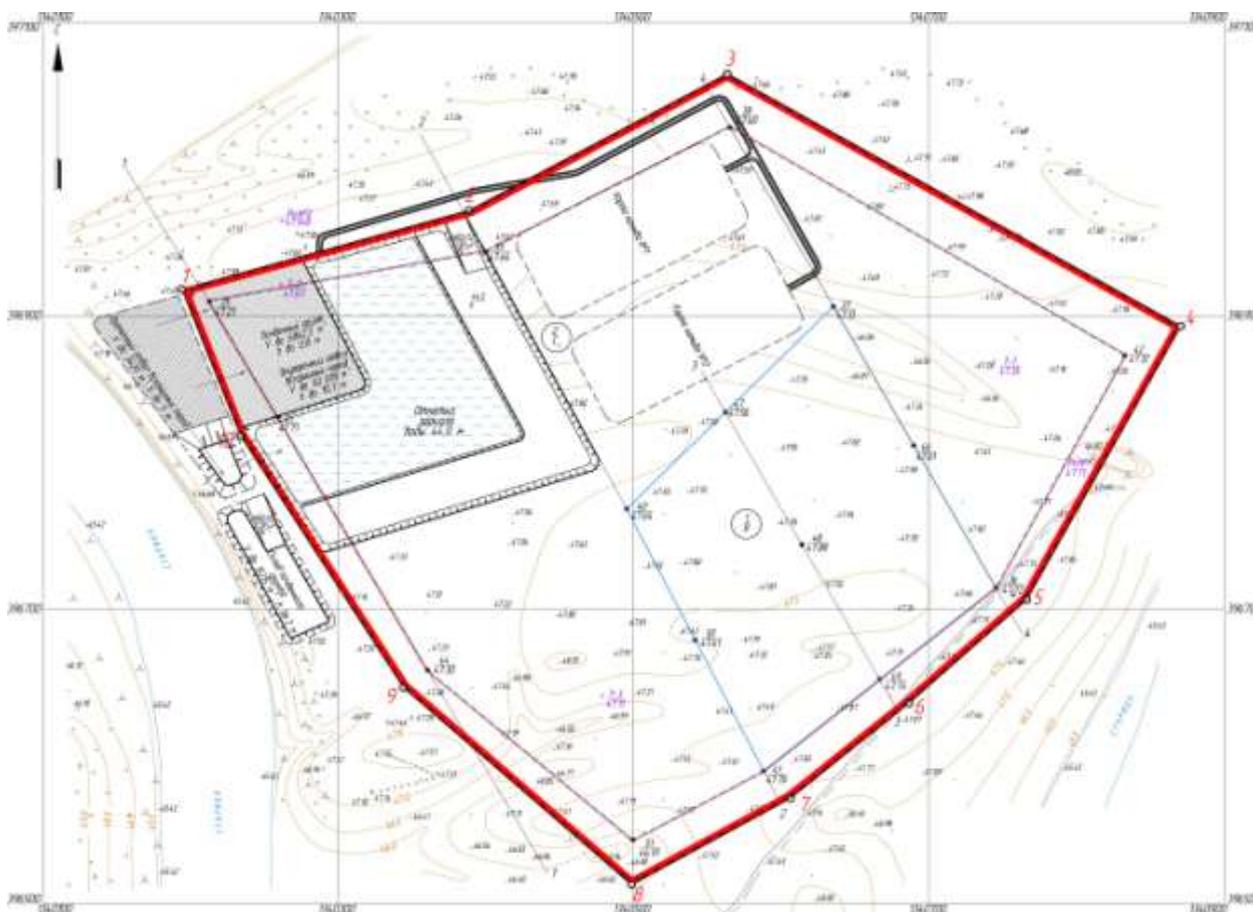


Рис. 1. План карьера на конец первого года эксплуатации

Параметры карьера на конец отработки приведены в табл. 5., план карьера на конец отработки - на рис.2.

Таблица 5

Параметры карьера на конец отработки

Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
Глубина карьера	м	до 14,3
Размеры карьера по поверхности:		
- длина	м	572
- ширина	м	452
- периметр	м	1786
- площадь (общая)	га	21,0 / 16,4*
Размеры карьера по дну:		
- длина	м	471
- ширина	м	382
- периметр	м	1632
- площадь	га	16,9 / 13,3*
Углы откосов вскрышных уступов [2, 37]:		
- рабочий	град	35
- нерабочий	град	30
Высота вскрышного уступа:		
- по почвенному слою	м	до 0,3
- по вскрыше	м	до 1,5
Угол откоса добычного уступа:		
- рабочий	град	30
- нерабочий	град	27
Высота добычного уступа	м	до 12,8
Угол откоса борта карьера на конец отработки	град.	28
Объем обрабатываемой горной массы:		
-общий, в том числе:	тыс. м <sup>3</sup>	2453,8
- почвенный грунт	тыс. м <sup>3</sup>	74,6
- вскрышные породы:		513,2
- от зачистки кровли:	тыс. м <sup>3</sup>	19,7
- от разбортовки	тыс. м <sup>3</sup>	204,2
- всего вскрыши	тыс. м <sup>3</sup>	289,3
- извлекаемые запасы ПГС	тыс. м <sup>3</sup>	1866,0
Средний коэффициент вскрыши:	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,31

\* Площадь карьера с учетом внутренних отвалов.

С целью исключения разубоживания полезного ископаемого породами, не входящими в границу подсчета запасов, за нижнюю бровку добычного уступа карьера на конец отработки принят контур подсчета запасов. Разнос борта за контур подсчета запасов производится с целью исключения потерь полезного ископаемого в бортах карьера. Добычной и вскрышной уступы на конец отработки сдваиваются в один уступ.

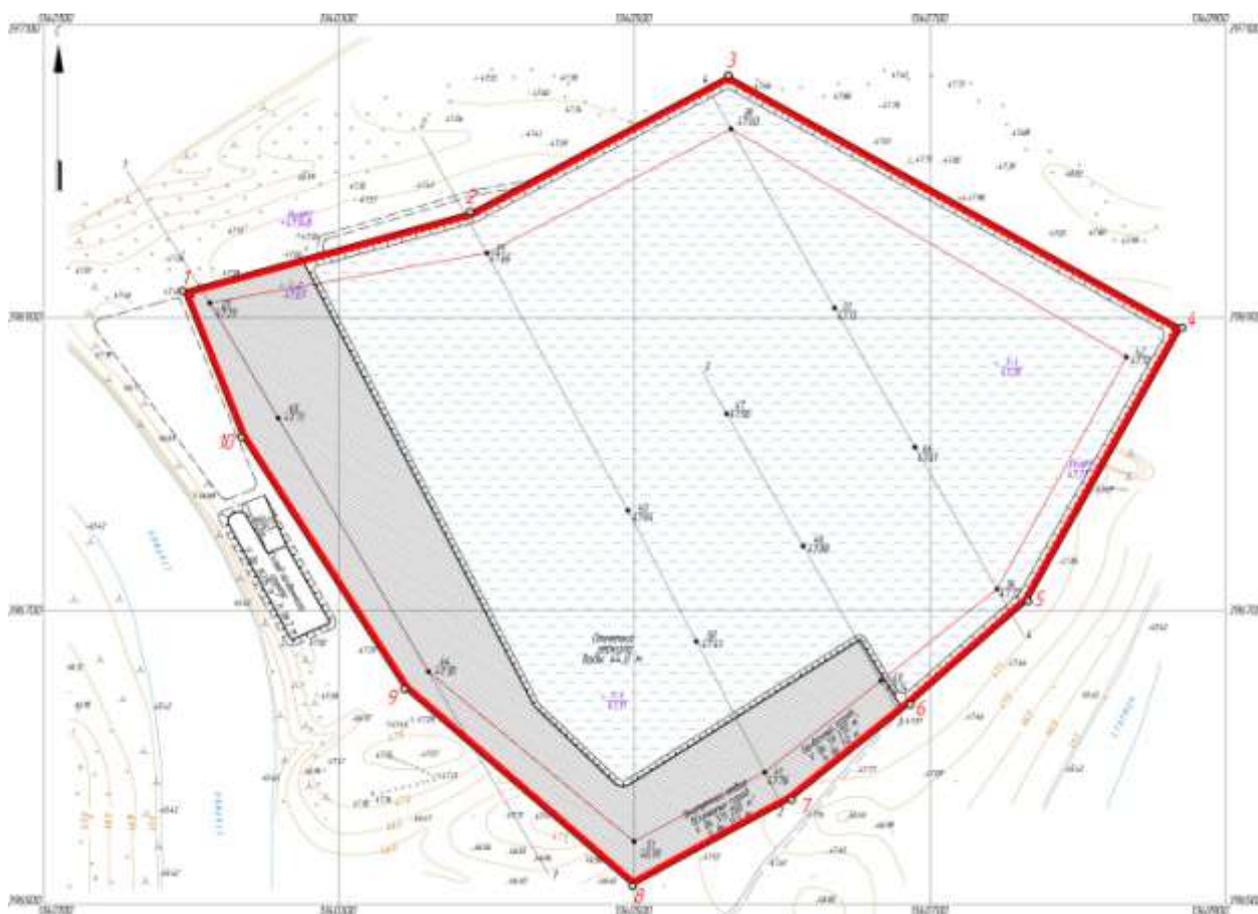


Рис. 2. План карьера на конец отработки месторождения

### Результаты исследования и их обсуждение

Успех мероприятий по уменьшению загрязнений зависит от эффективной регистрации и контроля общего состояния окружающей среды, чтобы точно знать, когда, где и какие необходимо принять меры [5]. Обязательной составляющей контроля выполнения природоохранных мероприятий является производственный экологический мониторинг.

Месторождение «Раннее» характеризуется простыми горно-геологическими и гидрологическими условиями. При разработке таких месторождений не требуется применения специальных методов проходки горных выработок и мероприятий по инженерной защите от опасных геологических процессов.

Разработка карьера несет в определенной степени антропогенную нагрузку на окружающую среду, поэтому требуется организация экологического мониторинга. Целью программы производственного экологического мониторинга является определение порядка сбора, систематизации и анализа информации о состоянии окружающей среды в районе работ, о причинах наблюдаемых и вероятных изменений состояния (т.е. об источниках и факторах воздействия), а также о допустимости таких изменений и нагрузок на среду в целом.

Основными факторами, определяющими структуру и содержание мониторинга на месторождении «Раннее», являются следующие:

- отсутствие в пределах площади разработки месторождения «Раннее» потенциально неустойчивых, легко деформируемых массивов горных пород, предрасположенных к развитию экзогенных геологических процессов;
- изменчивость физико-механических и водно-физических свойств горных пород незначительна и не повлияет на устойчивость бортов карьера;
- технологическая схема вскрытия, система и технология отработки месторождения позволит оказывать равномерное и сезонное воздействие на состояние окружающей среды;

– отсутствие необходимости применения специальных методов проходки горных выработок и специальных схем борьбы с подземными водами (фильтрационные завесы, системы закачки добычных вод и др.);

– проектом предусматривается внешнее отвалообразование. Почвенный грунт складировать отдельно для дальнейшего использования при рекультивации площадей, нарушенных горными работами;

– добытое полезное ископаемое транспортируется непосредственно потребителю;

– простые гидрогеологические условия разработки месторождения;

– необходимость проведения специальных мероприятий по инженерной защите от опасных геологических процессов отсутствует.

Основой для выделения отдельных классов служат перечисленные факторы. Поскольку в реальных условиях осложняющие факторы, определяющие сложность разработки месторождения, часто взаимосвязаны между собой, для практических целей можно осуществить мониторинг I класса в пределах зон существенного влияния разработки месторождения и сопутствующих ей процессов на состояние недр и других компонентов окружающей природной среды.

На площади проведения мониторинга месторождения «Раннее» может быть выделено три зоны:

зона I – зона непосредственного ведения горных работ и размещения других технологических объектов, влияющих на изменение состояния недр в пределах границ горного отвода;

зона II – зона существенного влияния разработки месторождения на различные компоненты геологической среды, находится в пределах санитарно-защитной зоны;

зона III – периферийная зона, примыкающая к зоне существенного влияния разработки месторождения (зона фонового мониторинга), находится за границами санитарно-защитной зоны.

В соответствии с действующим законодательством о недрах организация и ведение мониторинга в пределах зон I и II осуществляется недропользователем.

Необходимость и порядок организации и ведения мониторинга в зоне III должна определяться соглашением между недропользователем и органом управления государственным фондом недр.

Для крупных горнодобывающих предприятий ведение специальных наблюдений за изменением состояния геологической среды в зоне III целесообразно осуществлять недропользователю, так как полученная при этом информация позволит минимизировать платежи за загрязнение окружающей природной среды и будет способствовать рациональному ведению добычных и сопутствующих работ.

Контроль в точках рекомендуется проводить при неблагоприятных направлениях ветра – от предприятия в сторону подветренной контрольной точки.

К наблюдаемым специальным показателям относятся:

– расходы и уровни поверхностных вод; пересыхание и перемерзание, наледный сток;

– состояние горных выработок и их крепление;

– состояние устьев, фильтров и обсадных труб водозаборных и наблюдательных скважин, состояние насосного оборудования;

– физико-механические свойства и трещиноватость пород;

– планово-вертикальные деформации дневной поверхности для оценки оседания подрабатываемых территорий;

– данные геодезических и маркшейдерских наблюдений за деформациями склонов и бортов карьеров для оценки развития оползне-обвальных процессов;

– загрязнение атмосферного воздуха.

Мониторинг подземных и поверхностных вод при разработке месторождения должен быть составной частью горно-экологического мониторинга. Для обеспечения наиболее полной информации о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов

программой работ необходимо предусмотреть комплекс наблюдений по следующим блокам: гидрогеологическому, гидрологическому, метеорологическому, техногенному.

Система и структура мониторинга представлена в табл. 6 и на рис. 3. Соблюдение этой последовательности обеспечит выполнение требований охраны окружающей среды.

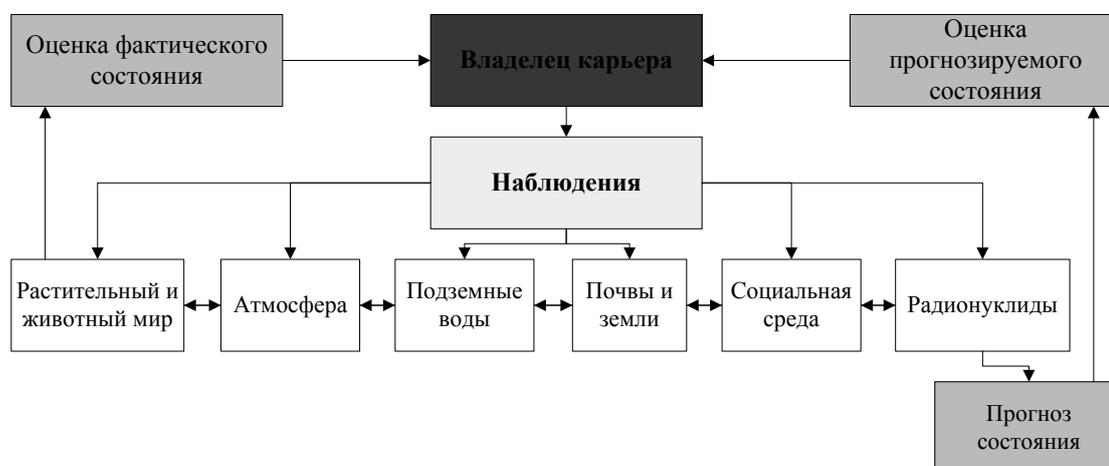


Рис. 3. Структура системы мониторинга

План карьера месторождения «Ранее» на конец четвертого года эксплуатации с указанием границы санитарно-защитной зоны и источников выбросов загрязняющих веществ приведен на рис.4.



Рис. 4. План карьера на конец четвертого года эксплуатации (2024 г.) с указанием границы санитарно-защитной зоны и источников выбросов загрязняющих веществ

Таблица 6

Система экологического мониторинга при добыче песчано-гравийных смесей  
в Оренбургской области

Реципиент, объект окружающей среды	Объект экологического мониторинга	Методика контроля	Точка проведения мониторинга	Периодичность	Количество проб/измерений
Атмосферный воздух населенных мест (СЗЗ)	Содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в период эксплуатации карьера: – ВВ; – азота диоксид	РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы»; ГОСТ 17.2.3.01-86 «Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных мест»; ГН 2.1.6.1338-03 «ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»	Т. 1 – центр карьера Т. 2 – северная граница СЗЗ	1 раз в неделю	1 раз в год согласно проекту установленной СЗЗ
Почвы населенных мест (СЗЗ)	Содержание загрязняющих веществ в почвах в период эксплуатации карьера: кобальт, фтор, хром, фтор, ртуть, бенз(а)пирен, ксилолы, хлористый калий, мышьяк, свинец, свинец + ртуть, сернистые соединения, стирол, формальдегид, хлористый калий	РД 39-0147098-015-90 «Инструкция по контролю за состоянием почв» Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв	Т. 3 – восточная граница СЗЗ	1 раз в месяц	1 раз в год согласно проекту установленной СЗЗ
Состояние недр	- объем извлекаемой горной массы; - количество и качество извлекаемого из недр мрамора: а) добытой из недр; б) потерянной при добыче; в) списанной в процессе утраты промышленного значения; г) не подтвердившейся при разработке; д) подлежащей корректировке при изменении технических границ; - элементы системы разработки; - деформация погашенных бортов и уступов	«Положение о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации» и «Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых», утвержденными Министерством природных ресурсов РФ соответственно 21.05.2001 г. и 04.08.2002 г.	Т. 4 – на въезде в карьер Т.5 – северный борт карьера	1 раз в год	1 раз в год согласно проекту мониторинга
Водные объекты	Содержание загрязняющих веществ в поверхностных водах: – взвешенные вещества – нефтепродукты – БПК <sub>полн.</sub> – хлориды – СПАВ – аммоний-ион – сульфаты – сухой остаток	ПНД Ф 14.1:2. 110-97 ПНДФ 14.1:2.50-96 ПНД Ф 14.1:2:4. 128-98 ПНДФ 14.1:2.114-97 ПНДФ 14.1:2:3.4.123-97 ПНДФ 14.1:2.100-97 ПНД Ф 14.1:2.96-97 ПНДФ 14.1:2.95-97 ПНД Ф 14.1:2.15-95 ПНДФ 14.1:2:4.138-98 ПНД Ф 14.1:2.1-95 ПНД Ф 14.1:2:4.135-98 ПНДФ 14.1:2.111-97 ПНД Ф 14.1:2:4.132-98 ПНД Ф 14.1:2.144-98	Т.6 - фоновый створ аккумуляющей емкости	1 раз в месяц	Единовременный отбор 1 пробы в точке проведения мониторинга

### Заключение

Природоохранные мероприятия, направленные на снижение негативного воздействия при разработке карьеров открытым способом типичны для всех месторождений: контроль выбросов, пылеподавления и исправности техники, рациональное использование земельных и водных ресурсов, проведение рекультивационных мероприятий по окончании добычи.

Обязательной составляющей природоохранного механизма является разработка отдельным документом программы экологического мониторинга антропогенного воздействия. Места отбора проб определяются по результатам комплексной интегральной оценки существующего состояния сред и устойчивости экосистемы, выявляющей зоны риска и кризиса.

Мониторинг позволяет контролировать не только соблюдение технологии добычи работ, но и выполнение природоохранных мероприятий.

Масштабы и стоимость работ не являются гарантией должной охраны окружающей среды от негативных воздействий. Разработка месторождений нерудных строительных материалов открытым способом в Оренбургской области может быть одним из экономически перспективных направлений деятельности в регионе. В условиях современного развития общества достижение подобного уровня в этом виде деятельности недопустимо и невозможно без соблюдения экологических требований, обеспечивающих эколого-экономическую сбалансированность деятельности в условиях рыночной экономики, улучшение экологической обстановки в регионе, устойчивость геосистем.

Предложенные природоохранные мероприятия позволят снизить негативное воздействие на компоненты окружающей среды в результате добычи открытым способом общераспространенных полезных ископаемых, а также обеспечат устойчивое развитие экосистем.

### Список литературы

1. Формирование технологических схем безопасной работы карьеров: монография / Цыганов А.В., Осинцев Н.А., Гавришев С.Е., Рахмангулов А.Н.// Магнитогорск, 2014. 134 с.
2. Положение о порядке лицензирования пользования недрами. Утв. Постановлением Верховного Совета Российской Федерации N 3314-1 от 15 июля 1992 года (с изменениями на 28 декабря 2013). М., 2013.
3. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Немчинова А.В. Влияние степени изученности геомеханического состояния массива на эффективность разработки месторождения // Актуальные проблемы горного дела. 2016. №2 (2). С. 14-21.
4. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А. Расширение области рационального использования техногенных георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. № 9. С. 252-258.
5. Тажетдинова Н.С., Иолин М.М. Геоэкологическая оценка и контроль антропогенного воздействия при добыче минерального сырья // Геология, география и глобальная энергия. 2011. №2. С. 235-341.
6. Проблемы современного ведения мониторинга земель / Е.М. Никулина, А.В. Синцов, Г.У. Адямова, А.Н. Бармин, М.М. Иолин // Сборник трудов молодых ученых первого экологического конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов 2007», 20-23 сентября 2007 г. Тол ьяти: ТГУ, 2007. С. 151-155.
7. Русский А.В. Формирование техногенного рельефа нарушенных территорий средствами гидромеханизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.15.03.Москва, 1999. 16 с.
8. Обоснование подхода к повышению полноты освоения запасов мрамора при совершенствовании технологии его добычи и переработки / Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Прохоров А.А., Гапонова И.В.// Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ: сб. науч. тр. по материалам II междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. С. 105-108.
9. Определение ценности техногенных георесурсов / Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А., Павлова Е.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 2 (30). С. 5-8.

### Сведения об авторах

**Гапонова Илона Владимировна** – магистр кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [gaponova.ilona@yandex.ru](mailto:gaponova.ilona@yandex.ru)

УДК 622.271.022

## ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-32Р

Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю.

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние различных факторов на работоспособность карьерных экскаваторов типа ЭКГ-32Р – технологического, личностного, технического, климатического. Отмечено, что одним из наиболее неблагоприятных является климатический фактор – с ним связано 17% отказов механического оборудования машин. Климатический фактор включает в себя воздействие на горное оборудование солнечной радиации, температуры окружающей среды, влажности воздуха, скорости ветра, туманов, метелей, снежных бурь и т.д. Изменения свойств конструкционных материалов зависят от интенсивности и продолжительности воздействия вышеперечисленных факторов и от их неблагоприятного сочетания. Существующие методики оценки влияния погодных условий на работу горного оборудования позволяют анализировать влияние каждого фактора по отдельности или вводят комплексные показатели отдельно для холодного и жаркого климата. Предлагается учитывать влияние климатического фактора на работу карьерных экскаваторов через комплексный показатель – индекс жесткости погоды, учитывающий влияние параметров как холодного, так и жаркого климата на протяжении всего календарного времени работы машины.

**Ключевые слова:** карьер, экскаватор, климат, температура воздуха, надежность, отказ, эксплуатация, индекс жесткости погоды.

### Введение

Карьерный экскаватор является основным звеном технологической цепи машин, применяемых при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. При эксплуатации экскаваторов наблюдается значительное количество отказов машин, и, в частности, их исполнительных механизмов. Простои экскаваторов, связанные с их отказами, составляют более 35% фонда рабочего времени [1 – 3].

Отказ экскаватора влечет за собой остановку всей технологической цепи, что приводит к значительным материальным потерям.

Определяющее влияние на остаточный ресурс экскаваторов при их эксплуатации оказывают внешние факторы, среди которых можно выделить:

- технологический фактор (качество подготовки забоя и горной массы);
- личностный фактор (уровень квалификации машиниста);
- технический фактор (техническое состояние экскаватора);
- климатический фактор;
- организационный фактор (организация ведения горных работ).

По данным завода-изготовителя, отказы механического оборудования карьерных экскаваторов распределяются следующим образом: личностный фактор является причиной 40% отказов, технический – 19%, климатический – 17%, организационный – 14% и технологический фактор – 10% (рис. 1). [4, 5]

В данной работе приведен анализ влияния климатического фактора на показатели надежности карьерных экскаваторов.

### Анализ влияния погодных условий на работоспособность карьерных экскаваторов

Карьерные экскаваторы находятся в эксплуатации в различных климатических районах Земли, как в условиях Крайнего Севера, так и в условиях пустынь и влажных тропиков. Наиболее существенно на горное оборудование влияют низкие и высокие температуры воздуха, влажность воздуха, солнечная радиация, скорость ветра, туманы, метели, снежные бури и др. Изменения свойств конструкционных материалов зависят от интенсивности и продолжительности воздействия вышеперечисленных факторов и от их неблагоприятного сочетания.

Действие солнечной радиации и температуры окружающей среды на металлоконструкции машин вызывает изменение как их температуры, так и температуры воздуха, заключенного внутри кузовов, кабин управления, корпусов, редукторов и др. В результате данного воздействия возникают температурные деформации металлоконструкций и деталей машин и изменяются условия теплообмена.

Весьма существенно влияют на свойства конструкционных и эксплуатационных материалов и надежность машин низкие температуры воздуха. Они действуют на машины непосредственно, изменяя основные физико-механические свойства, и косвенно, изменяя условия работы машин вследствие попадания пыли, воды, снега в открытые механизмы, образования инея, наледей и др.

При высоких температурах ухудшаются свойства смазочных материалов, ускоряется старение полимерных материалов, а также повышается утомляемость машинистов, снижается их концентрация, скорость реакции и работоспособность в целом.

«Высокая влажность воздуха, особенно в сочетании с высокой температурой окружающей среды, способствует повышению интенсивности коррозии металлов, окислению контактов электрических аппаратов и приборов, а также быстрому старению резинотехнических изделий» [6].

Скорость ветра действует на машины как силовой нагрузочный фактор, создавая дополнительные напряжения в элементах машин.

Влиянию низких температур на работоспособность карьерных экскаваторов посвящены работы следующих ученых: В.С. Квагинидзе [7], Д.Е. Махно [8], А.И. Шадрин [3]. Исследованиями данных и других авторов установлено, что погодные условия оказывают существенное влияние на показатели работы горной техники. Например, производительность экскаваторов при эксплуатации в температурных режимах от минус 60 °С до плюс 50 °С отличается в 1,6-2,0 раза [4].

Климатический фактор является комплексным, включающим в себя воздействия множества параметров, таких как температура окружающей среды, влажность воздуха, скорость ветра и др. [9 – 12]. Для оценки влияния климатического фактора как такового на надежность машин необходимо данное множество параметров свести к одному интегральному показателю, учитывающему «весомость» каждого из параметров. Такой показатель, получивший название «техническая жесткость климата», был предложен П.И. Кохом [13]. По П.И. Коху, техническая жесткость оценивается отдельно для жаркого и холодного климата.

Техническая жесткость холодного климата определяется следующим образом [14 – 15]:

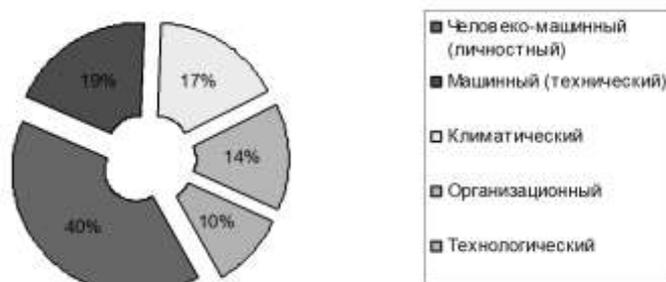


Рис. 1. – Факторы, являющиеся причинами выхода из строя оборудования

$$N_k = \left(\frac{3}{4} t_{\min \text{cp}} + \frac{1}{4} t_{\min \text{абс}}\right) (1 + 0,015 \sigma_x) (1 + 0,07 v_x) (1 + 0,26 \varphi_x) (1 + 0,014 n_{\text{т.м}}) (1 + 0,022 \tau_x),$$

где  $N_k$  – техническая жесткость холодного климата, балл;  $t_{\min \text{cp}}$  – средний минимум температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С;  $t_{\min \text{абс}}$  – среднее значение абсолютного минимума температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С;  $\sigma_x$  – средняя амплитуда суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее холодных месяца, °С;  $v_x$  – средняя скорость ветра за три наиболее холодных месяца, м/с;  $\varphi_x$  – среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее холодных месяца, доли единицы;  $n_{\text{т.м}}$  – среднее значение числа дней с туманом, метелью и пыльной бурей за три наиболее холодных месяца;  $\tau_x$  – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха ниже 0 °С.

Техническая жесткость жаркого климата по П.И. Коху рассчитывается следующим образом [14]:

$$S_k = (0,55 t_{\max \text{cp}} + 0,2 t_{\max \text{абс}}) (1 + 0,01 Q_{\text{т}}) (1 + 0,0075 \sigma_{\text{т}}) \times \\ \times (1 - 0,03 v_{\text{т}}) \left(1 + \frac{0,08}{\varphi_{\text{т}}}\right) (1 + 0,009 n_{\text{б.т.}}) (1 + 0,012 \tau_{\text{т}}),$$

где  $S_k$  – техническая жесткость жаркого климата, балл;  $t_{\max \text{cp}}$  – средний максимум температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С;  $t_{\max \text{абс}}$  – среднее значение абсолютного максимума температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С;  $Q_{\text{т}}$  – среднее значение суммарной солнечной радиации за три наиболее теплых месяца, ккал/см<sup>2</sup>;  $\sigma_{\text{т}}$  – средняя амплитуда суточных колебаний температуры воздуха за три наиболее теплых месяца, °С;  $v_{\text{т}}$  – средняя скорость ветра за три наиболее теплых месяца, м/с;  $\varphi_{\text{т}}$  – среднее значение относительной влажности воздуха за три наиболее теплых месяца, доли единицы;  $n_{\text{б.т.}}$  – среднее за месяц значение числа дней с пыльной бурей, метелями и туманом за три наиболее теплых месяца;  $\tau_{\text{т}}$  – продолжительность действия в месяцах средней температуры воздуха выше 0 °С.

Поскольку карьерные экскаваторы находятся в эксплуатации круглогодично, то они испытывают воздействие как «холода», так и «жары», что особенно ярко проявляется в регионах с резко континентальным климатом. В связи с этим ранговый анализ по П.И Коху не всегда дает возможность в полной мере оценить влияние климатического фактора на надежность карьерных экскаваторов.

Предлагается, основываясь на исследования П.И. Коха, перейти к единому интегральному показателю – индексу жесткости погоды, учитывающему влияние параметров как холодного, так и жаркого климата на протяжении всего календарного времени работы машины.

Согласно методике, изложенной в работе [1], индекс жесткости погоды определяется следующим образом:

$$I_{\text{п}} = (0,75 |t_{\min/\max \text{cp}} - 8| + 0,25 |t_{\min/\max \text{абс}} - 2|) (1 + 0,015 \sigma) (1 + 0,07v) \times \\ \times (1 + 0,26\varphi) (1 + 0,01Q) (1 + 0,014n) (1 + 0,022 \tau),$$

где  $I_{\text{п}}$  – индекс жесткости погоды;  $t_{\min/\max \text{cp}}$  – среднемесячная температура, С°;  $t_{\min/\max \text{абс}}$  – абсолютный max/min температуры, С°;  $\sigma$  – средняя непериодическая амплитуда суточных колебаний температуры воздуха, С°;  $v$  – средняя скорость ветра, м/с;  $\varphi$  – среднее значение относительной влажности воздуха, доли единицы;  $Q$  – среднее значение месячной суммы суммарной солнечной радиации, ккал/см<sup>2</sup>;  $n$  – среднее за месяц значение числа дней с

метелями, туманом и пыльной бурей;  $\tau$  – продолжительность действия в месяцах положительных/отрицательных температур.

### Выводы

В работе проведен анализ работы карьерных экскаваторов ЭКГ-32Р, эксплуатирующихся в КРУ «Краснобродский». Поскольку данное предприятие находится в Сибирском федеральном округе, для оценки влияния климатического фактора на эксплуатацию экскаваторов был проведен расчет индекса жесткости погоды для условий данного региона.

Экскаваторы ЭКГ-32Р спроектированы для эксплуатации в условиях умеренного климата, что соответствует диапазону температур от -40 до +40 °С. В результате сопоставления расчетных значений индекса жесткости погоды в рассматриваемый период эксплуатации с температурой воздуха в этот же период была получена таблица соответствия этих параметров (табл.1).

Таблица 1

Соответствие индекса жесткости погоды температуре воздуха

Индекс жесткости погоды	0÷10	10÷20	20÷30	30÷40	40÷50	50÷60	60÷70	70÷80	80÷90
Диапазон отрицательных температур, °С.	0÷-2,5	-2,5÷-9	-9÷-16	-16÷-22	-22÷-29	-29÷-35	-35÷-45	-45÷-49	-49÷-55
Диапазон положительных температур, °С.	0÷5	5÷15	15÷24	24÷31	31÷37	37÷44			

Из таблицы 1 следует, что при индексе жесткости погоды более 55 в теплое время года и более 65 в холодное время года температурные условия эксплуатации выходят за пределы проектных значений. Следовательно, условия эксплуатации экскаваторов при индексе жесткости погоды более 55 являются наиболее неблагоприятными.

На рис. 2 представлено изменение индекса жесткости погоды в период с 2011 по 2015 гг.

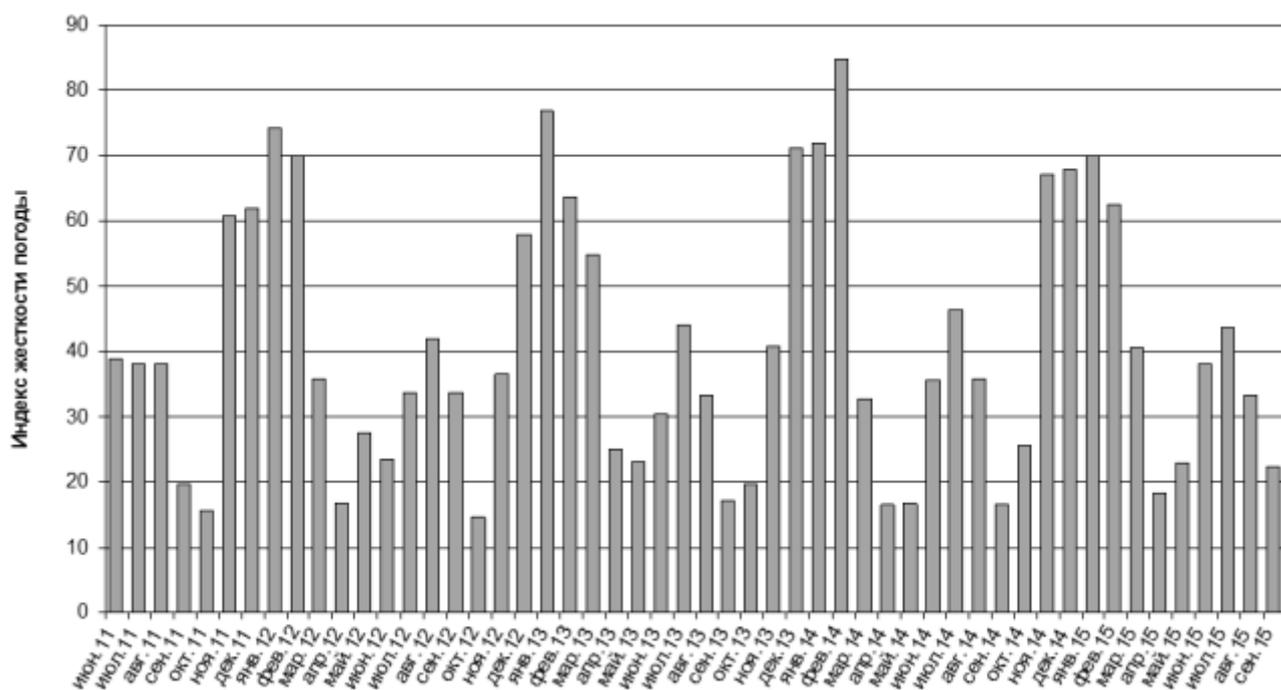


Рис. 2 – Изменение индекса жесткости погоды в Сибирском ФО за период с 2011-2015 гг.

Из диаграммы можно сделать вывод, что наибольшее значение индекса жесткости погоды, характеризующее наименее благоприятные условия, приходится на холодное время года.

По результатам анализа представленной выше диаграммы было получено распределение времени эксплуатации карьерных экскаваторов типа ЭКГ при различных индексах погоды.

Наибольшее время эксплуатации (25 %) приходится на интервал индекса жесткости погоды 30-40. В неблагоприятных климатических условиях, а именно при значениях индекса жесткости погоды более 55 экскаваторы эксплуатируются 30% от общего времени, что позволяет сделать вывод о значительном влиянии климатического фактора на эксплуатацию экскаваторов ЭКГ-32Р в рассматриваемых условиях.

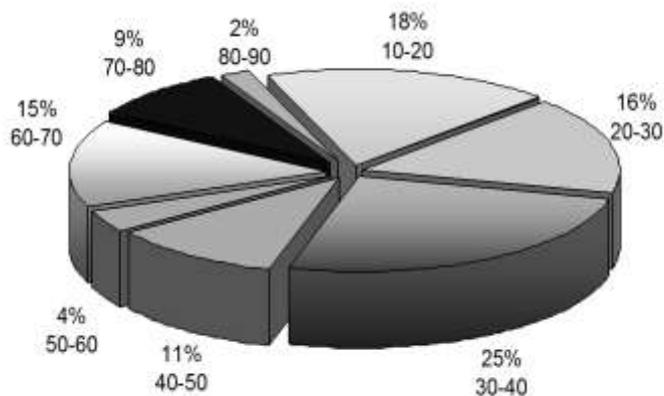


Рисунок 3 – Распределение времени эксплуатации экскаваторов при индексах жесткости погоды

Для оценки влияния погодных условий на надежность работы карьерных экскаваторов ЭКГ-32Р, учитывая разный уровень вклада различных условий на снижение работоспособности, встала задача приведения этих факторов. В качестве базы приведения были взяты нормальные условия эксплуатации экскаватора согласно паспорту машины, на которые приходится примерно 1/4 от общей наработки экскаватора. Индекс жесткости погоды для этих условий находится в пределах 30-40.

Для приведения были использованы повышающие коэффициенты, равные отношению базовой величины наработки к фактической в пределах выбранных интервалов индекса жесткости погоды. Умножая данные коэффициенты на фактическую наработку в пределах заданной жесткости, удалось выровнять между собой временные промежутки функционирования экскаватора во всем диапазоне интервалов индекса жесткости погоды. Индексы жесткости погоды и соответствующие им повышающие коэффициенты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие повышающих коэффициентов индексу жесткости погоды

$I_n$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90
$k_n$	1,39	1,56	1	2,27	6,25	1,67	2,78	12,5

Приведенное количество отказов в выровненных интервалах наработки позволяет выявить функциональные зависимости влияния только погодных проявлений на безотказную работу экскаватора при прочих равных условиях.

В результате сопоставления приведенного количества отказов, определенного на основе статистических данных с учетом повышающих коэффициентов с индексом жесткости погоды, были получены зависимости, представленные на рис. 4.

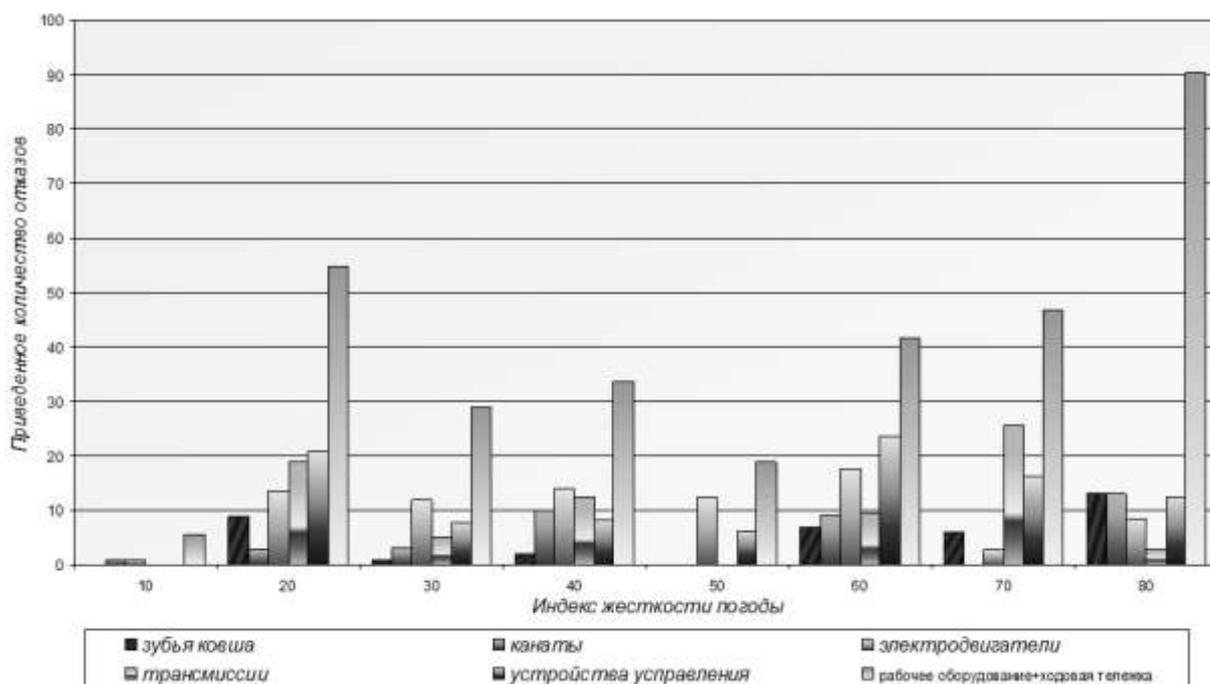


Рис. 4. Зависимости приведенного количества отказов от индекса жесткости погоды

На рисунке 4 представлены распределения количества отказов карьерного экскаватора ЭКГ-32Р по узлам, а именно: электродвигатели, устройства управления, канаты, трансмиссии, зубья ковша, рабочее оборудование и ходовая тележка.

Из представленной выше диаграммы видно, что погодные условия в наибольшей степени влияют на отказы рабочего оборудования и ходовой тележки, а наименьшее влияние оказывается на трансмиссии машины.

### Список литературы

1. Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю., Шибанов Д.А. Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условия на работоспособность карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. 2017. № S38. С. 359-368.
2. Самолазов А.В., Донченко Т.В., Шибанов Д.А. Практические результаты внедрения экскаваторов ЭКГ-18Р и ЭКГ-32Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» на угледобывающих предприятиях России // Уголь. 2013. №4. С. 36-38.
3. Шадрин А.И., Орхон Л. Влияние погодно-климатических факторов на надежность экскаваторов угольного разреза «Баганурский» // Вестник ИрГТУ. 2013. №10 (81). С. 71-74.
4. Анализ технического состояния карьерных экскаваторов/ Иванова П.В. , Иванов С.Л., Кувшинкин С.Ю., Шибанов Д.А., Фокин А.С. // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: материалы Международной научно-практической конференции. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. Отдельный выпуск № 60-1. С.363-373.
5. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства ИЗ-КАРТЭКС / Шибанов Д. А., Шишлянников Д. И., Иванова П. В., Иванов С. Л. // Горное оборудование и электромеханика. 2015. №9. С. 3-9.
6. Nishinaka H. The effects of the environmental conditions of some Zener voltage references // Conference Digest 2002 Precision Electromagnetic Measurements, 2002. 166 pp.
7. Квагинидзе В.С. Ремонтная технологичность металлоконструкций карьерных механических лопат на угольных разрезах Севера. 2-е изд., стер. Москва: Мир горной книги [и др.], 2007. 223 с.
8. Махно Д.Е., Шадрин А.И. . Эксплуатация и ремонт механических лопат в условиях Севера: справочное пособие /М. : Недра, 1992. 127 с.

9. Campelo Ana Carla de Melo Moreira. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil / Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane // REM – International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3. P. 443 – 449.
10. Enyindah Ndamzia Clement. Using Diagnosis and Life Cycle Cost to Improve Reliability of an Excavator / Enyindah Ndamzia Clement, Amadi Rex Kemkom // European Journal of Engineering Research and Science. 2019. Vol. 4. Iss. 3. P. 22-26
11. Lazarević O., Lazarević B. Determining the dynamic characteristics of hydraulic excavators // Vojnotehnički glasnik. 2018. Vol. 66. Iss. 1. P. 41-62.
12. Moradi Afrapoli A., Askari-Nasab H. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. Vol. 31. No 1. P. 42-60.
13. Морозов А.Г., Колосов А.А. Оценка жесткости климатологических факторов при эксплуатации транспортных средств в Северо-Западном федеральном округе // Технико-технологические проблемы сервиса. 2014. №3 (29). С. 14-19
14. Кох П.И. Климат и надежность машин. М.: Машиностроение, 1981. 175 с.
15. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions / Journal of Mining Institute, № 242, 2020. P. 228 - 233.

#### **Сведения об авторах**

**Иванова Полина Викторовна** - канд. техн. наук, начальник управления учебно-методического обеспечения образовательного процесса, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [Ivanova\\_PV@pers.spmi.ru](mailto:Ivanova_PV@pers.spmi.ru),

**Кувшинкин Сергей Юрьевич** - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [Kuvshinkin\\_SYu@pers.spmi.ru](mailto:Kuvshinkin_SYu@pers.spmi.ru),

УДК 622.7.01

**ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПОТОКЕ****Гришин И.А.**

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема аналитического контроля в производственной сфере обогащения полезных ископаемых экспресс методами в потоке. Показано преимущество системы непрерывного контроля, дана зарубежная классификация промышленных систем аналитического контроля и сделан их анализ. Перечислены направления развития процессов автоматизации и указаны недостатки используемых спектрометров и систем детектирования, применяемых для построения схем аналитического контроля. Даны примеры спектров, расшифровка которых затруднена из-за наложения характеристических линий.

**Ключевые слова:** минеральное сырьё, аналитический контроль, обогащение, металлургия, спектрометры.

***Введение***

Аналитический контроль в производственной сфере обогащения полезных ископаемых имеет огромное значение, так как дает возможность мобильного регулирования технологического процесса при изменении качества исходного сырья, позволяет судить о его соответствии установленным режимам и о качестве готовой продукции.

Аналитический контроль химического состава и свойств перерабатываемого сырья, промежуточных продуктов и товарной продукции можно выделить в двух основных задачах: задача отчетного контроля и задача оперативного контроля [1]. При отчетном контроле длительность и сложность анализа не играют главной роли, поэтому отчетный контроль может производиться как классическими, так и современными физическими и физико-химическими методами. Информация отчетного контроля необходима на более высоких уровнях управленческой структуры и используется для оценки эффективности отдельных участков, цехов предприятия или всего предприятия в целом, получения аналитической информации о характеристиках отдельных технологических процессов, расчета технико-экономических показателей. Оперативный контроль в отличие от отчетного требователен к скорости анализа, поскольку эта информация предназначена для непосредственного управления процессом производства. Таким образом, проведение оперативного контроля целесообразно вести дискретно, с выдачей информации синхронно с технологическим процессом либо непрерывно.

Обеспечение данных требований возможно только за счет применения автоматических или полуавтоматических анализаторов, включенных в автоматизированные системы аналитического контроля.

***Анализ существующих промышленных систем аналитического контроля***

Развитие промышленных систем аналитического контроля напрямую связано с совершенствованием систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). Специфика систем аналитического контроля по сравнению с другими информационно-измерительными системами заключается в особой сложности получения аналитической информации. Системы аналитического контроля иногда представляют собой законченные технологические процессы, включающие отбор, разделку, транспортировку и подготовку проб к анализу, измерение аналитического сигнала, а также обработку результатов анализа. Системы непрерывного контроля имеют существенное преимущество за счет постоянного отслеживания изменений физических и химических свойств материала, что позволяет

оперативно и своевременно регулировать технологический процесс. Но методы экспресс-контроля обладают высокой погрешностью измерений. Для получения более точной информации необходимо совершенствование методов получения и обработки результатов измерений элементного состава и физических свойств продуктов технологического процесса.

В табл. 1 представлена зарубежная классификация промышленных систем аналитического контроля [2]. Общепринятых русскоязычных терминов для обозначения этих способов контроля не существует.

В простейшем случае производится отбор пробы и её доставка в центральную лабораторию, где производится её анализ любым лабораторным методом (Off-line). Так поступают на многих промышленных предприятиях для контроля химического состава поступающего сырья и промпродуктов [3-5]. При такой системе отбора проб можно выделить два главных недостатка: во-первых, отбираемые пробы не отражают по химическому составу всю массу материала ввиду гранулометрической и петрографической неоднородностей [6], а во-вторых, на отбор проб, их подготовку и доставку уходит много времени. Технологическому персоналу информация о химическом составе поступает уже после того, как проанализированный материал прошел технологический процесс и его корректировка уже невозможна.

Таблица 1

Классификация систем аналитического контроля

Аналитический процесс	Подготовка проб	Доставка проб	Анализ
Off-line	Ручная	До отдаленной лаборатории	Ручной либо автоматический
At-line	Ручная	До местного оборудования	Ручной экспресс-анализ либо автоматический
On-line	Автоматическая	Совмещена с анализом	Автоматический
In-line	Совмещена с анализом	Не требуется	Автоматический
Noninvasive	Не требуется	Не требуется	Автоматический

Поэтому применение Off-line - процессов целесообразно только для отчётного контроля. Процесс At-line отличается тем, что химический анализ производится непосредственно в цехе. Это позволяет сократить время доставки проб. В таких системах часто применяются переносные компактные спектрометры, работающие автономно. В системах типа Off-line и At-line для повышения точности анализа и сокращения время анализа используются автоматизированные системы отбора, подготовки проб и химического анализа [7-9], применяется создание автоматических лабораторий [10] и лабораторных роботов. В некоторых случаях создаются байпасные линии [11]. Непрерывно отбираемую из потока пробу измельчают и направляют на дополнительный конвейер (On-line). В этом случае анализ производится непрерывно на дополнительном конвейере либо периодически в специальных камерах. Этот метод не обеспечивает непрерывного контроля химического состава непосредственно в технологическом потоке. Кроме того, создание On-line - системы требует значительных капитальных затрат и затрат по обслуживанию пробоотборников, бункеров, падающих и сбрасывающих конвейеров, дробилок, конвейера под анализатором [12]. In-line - и Noninvasive - системы отбор проб не предполагают, производя анализ непосредственно в технологическом потоке. При способе In-line датчик для определения химического состава вводится непосредственно в технологический поток. Такие системы предназначены для анализа пульпы в потоке [13] и не могут применяться для сыпучих

материалов. Noninvasive - системы используют бесконтактные методы анализа: части аналитического комплекса расположены вне технологического потока [14].

Системы, предназначенные для рентгеноспектрального анализа в потоке, рационально систематизируют по объекту контроля (рис. 1). При этом основные технологические, технические, методологические и программные требования при проектировании систем автоматизированного аналитического контроля определяются самим материалом и условиями его транспортировки.

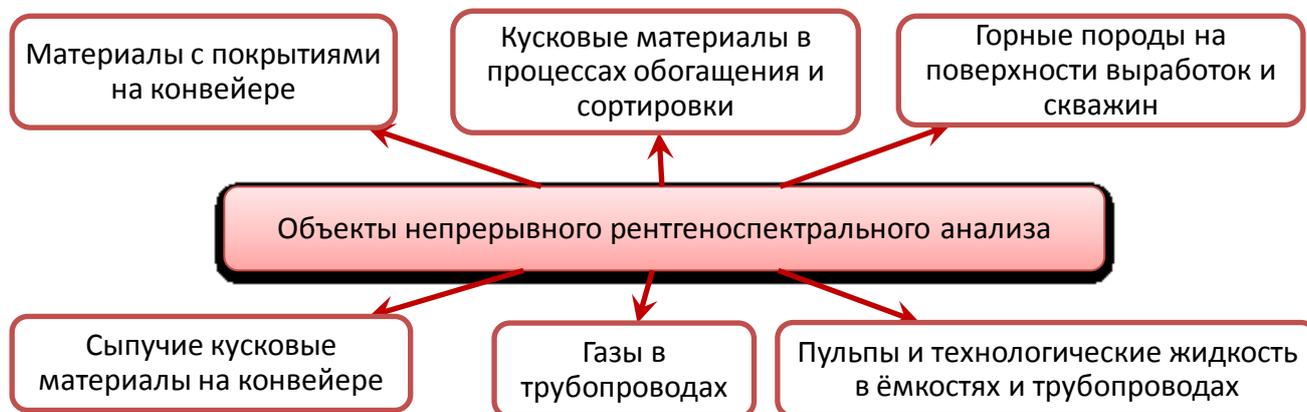


Рис. 1. Распределение систем анализа в потоке по объекту контроля

#### ***Современные технические решения непрерывного контроля элементного состава***

Процессы автоматизации аналитического контроля развиваются параллельно в двух направлениях [15]:

- 1) автоматизация отдельных стадий аналитического контроля;
- 2) объединение разрозненных частей в интегрированные системы.

Для первого направления наиболее важной задачей является обеспечение отбора представительной пробы. Для этого может применяться как периодический, так и непрерывный отбор проб [5, 8]. Распространенным методом периодического отбора проб для сыпучих и кусковых материалов является использование автоматизированных систем отбора проб, например маятникового пробоотборника [16].

Непрерывный отбор проб сыпучего материала производят ответвлением части потока при помощи специальных устройств [17].

Для второго направления применяется два подхода к решению этой задачи. Первый подход состоит в проведении химического анализа в специализированных аналитических лабораториях, которые оборудованы системами отбора проб, их подготовки и транспортировки, а также анализа проб [10]. Второй подход состоит в проведении анализа непосредственно в потоке материала [18]. В настоящее время наблюдается тенденция на переход ко второму подходу, хотя автоматизированные пробоотборники всё ещё имеют широкое распространение.

В целом при решении задачи аналитического контроля химического состава сыпучих и кусковых материалов в технологических потоках непосредственно возникают следующие сложности [18]:

- 1) неравномерность загрузки технологического потока, прерывания потока;
- 2) непостоянство слоя материала и расстояния между материалом и спектрометром;
- 3) неравномерность гранулометрического состава;
- 4) непостоянство влажности анализируемого материала;
- 5) запыленность производственного помещения.

Для анализа руд, концентратов и других видов минерального сырья применялся рентгенорадиометрический метод, основанный на линейной зависимости между

интенсивностью отраженных от пробы  $\beta$ -частиц или проходящих сквозь пробу  $\gamma$ -лучей от содержания определяемого элемента.

Анализируемый материал при этом рассматривается как система  $n$  компонентов и решают систему уравнений поглощения  $\gamma$ -лучей или отражения  $\beta$ -частиц от  $n-1$  источников.

На настоящий момент в России разработками по аналитическому контролю сыпучих и кусковых материалов в потоке занимаются следующие организации: ОАО «НПП «Буревестник»», НВЦ ООО «Форатех», ООО «CCS Services», ООО «Метроникс», ОАО «НИИ ТФА», ООО «Радос». Сравнение современных спектрометров для потокового анализа химического состава приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение современных рентгенофлуоресцентных спектрометров

Наименование прибора	Фирма производитель	Анализируемые материалы	Источник первичного излучения	Метод анализа	Детектор (энергетическое разрешение, эВ)
АР-31/35	ОАО «НПП «Буревестник»» (Россия)	Пульпы, суспензии, растворы	Рентгеновская трубка	ВД РФА	Пропорциональный счетчик
БР-18	ОАО «НПП Буревестник» (Россия)	Пульпы, суспензии, растворы	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Si-pin (230)
CON-X 03	Baltic Scientific Instruments (Латвия)	Сыпучие и кусковые материалы	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Si-полупроводниковый дрейфовый детектор (160)
ОХЕА 500-3	Indutech GmbH (Германия)	Уголь	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Si-полупроводниковый детектор (155)
АПУР «Аглоконт»	НВЦ ООО «Форатех» (Россия)	Руда, концентрат	Радиоизотоп	РФА	Пропорциональный счетчик
АПУР «МЭДА»	НВЦ ООО «Форатех» (Россия)	Руда	Радиоизотоп	РРА	Пропорциональный счетчик
АПУР «МЭДА-Поток»	НВЦ ООО «Форатех» (Россия)	Руда	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Пропорциональный счетчик
АПУР «ПульпоКонт»	НВЦ ООО «Форатех» (Россия)	Пульпы	Радиоизотоп	РФА	Пропорциональный счетчик
SOLAS On-Line Analyser	APC Analitics (Германия)	Сыпучие материалы	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Пропорциональный счетчик
SOLA II	Thermo Fisher Scientific Inc. (США)	Топливо	Рентгеновская трубка	РФА	Нет данных
Niton XL3t	Thermo Fisher Scientific Inc. (США)	Руды, металлические сплавы	Рентгеновская трубка	ЭД РФА	Si-полупроводниковый дрейфовый детектор
Courier 6i SI	Outotec Oyj. (Финляндия)	Пульпы	Рентгеновская трубка	ВД РФА	Пропорциональный счетчик
РКЦ-1М	ОАО «НИИТФА» (Россия)	Сыпучие и кусковые материалы	Радиоизотоп	ЭД РФА	Пропорциональный счетчик
РКС «СТАРКК»	ООО «Радос» (Россия)	Сыпучие и кусковые материалы	Рентгеновская трубка	РРА	Полупроводниковый детектор (200)
ПРК-2	ООО «Радос» (Россия)	Сыпучие и кусковые материалы	Рентгеновская трубка	РФА	Твердотельный Si-детектор (300)

При анализе табл. 2 видно, что наибольшее распространение получили спектрометры с энергетической дисперсией. При этом на условия работы спектрометра накладываются довольно жесткие ограничения. Кроме того, лучшее разрешение детектора, из применяющихся в настоящее время составляет 160 эВ.

В работе [22] показано, что самые современные энергодисперсионные детекторы обладают наилучшим разрешением до 80 эВ. Сравнительный анализ волнодисперсионных и энергодисперсионных детекторов, проведенный в работах [23-28] позволяет выделить следующие преимущества энергодисперсионных детекторов:

- 1) меньшая стоимость;
- 2) простота конструкции;
- 3) компактность;
- 4) высокая скорость счета (105-106 имп./с);

Однако при этом энергодисперсионные детекторы имеют ряд недостатков:

- 1) меньшая, чем у волнодисперсионных детекторов чувствительность;
- 2) ограниченный диапазон элементов, доступных для анализа;
- 3) нелинейность фона под характеристическими линиями.

Исходя из вышесказанного и результатов, проведенных нами исследований, к основным сложностям, возникающим при построении систем аналитического контроля, добавляется ещё один недостаток – существующие спектрометры и системы детектирования, применяемые для построения систем аналитического контроля, имеют недостаточную разрешающую способность детектора, поскольку используются либо пропорциональные счетчики, имеющие энергетическое разрешение порядка 800-100 эВ, что не позволяет различать характеристические линии меди и цинка, а также получать частичное перекрытие линии железа и линии цинка, как показано на рис. 2, либо полупроводниковые детекторы с энергетическим разрешением 160-250 эВ, что также приводит к частичному либо полному перекрытию характеристических линий, как показано на рис. 3 и 4, что не позволяет точно определять содержание каждого элемента, чьи аналитические линии перекрываются, что вносит дополнительную погрешность.

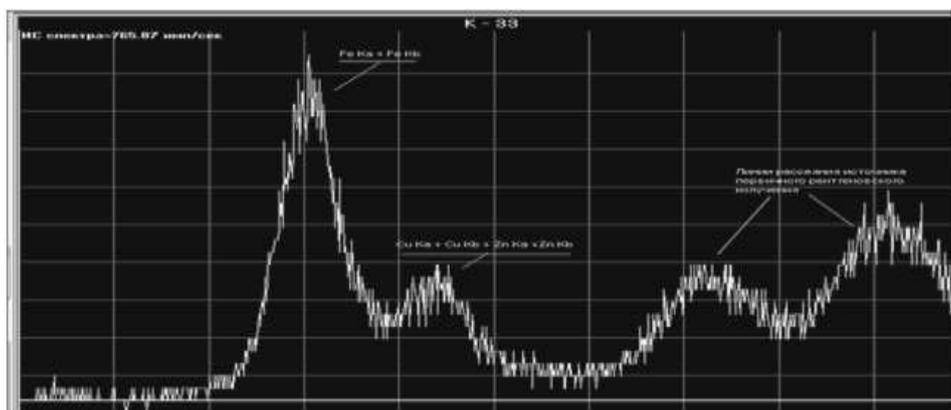


Рис. 2. Спектр медно-цинковой руды, полученный с помощью пропорционального счетчика

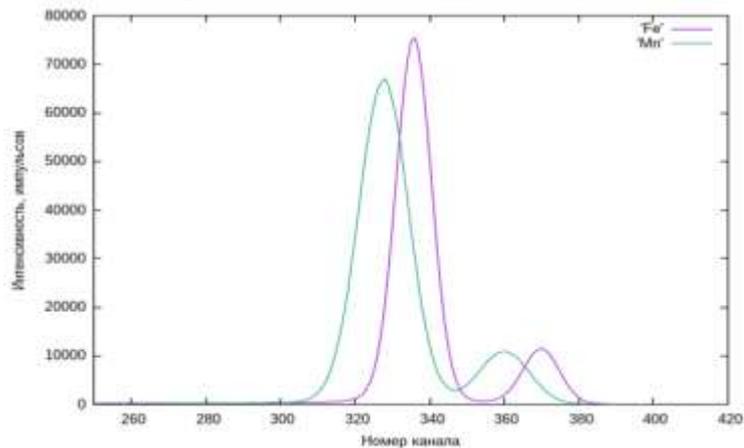


Рис. 3. Наложение характеристических линий марганца и железа

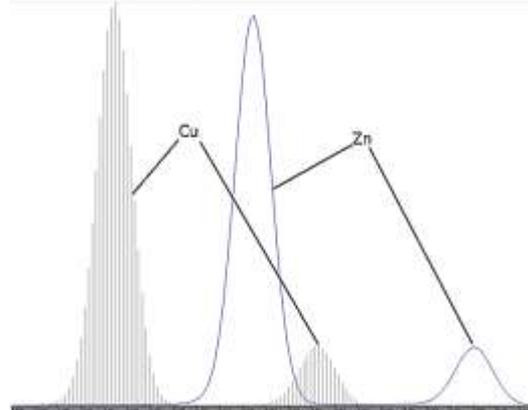


Рис. 4. Наложение линий меди и цинка

Таким образом, все современные системы автоматизированного аналитического контроля, несмотря на то, что обеспечивают приемлемую точность измерений, всё ещё остаются недостаточно эффективными и точными для получения высокоточных результатов.

### **Заключение**

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что задача аналитического контроля кусковых и сыпучих материалов непосредственно в технологическом потоке не решена полностью. Существующие решения базируются на спектрометрах с энергетической дисперсией либо пропорциональных счетчиках. Большинство создаваемых систем требуют значительных капитальных затрат как на создание системы, так и на её обслуживание по причине того, что запыленность помещений, непостоянство влажности и гранулометрического состава, дрейф электронных компонентов спектрометра могут приводить к появлению систематической ошибки.

Кроме того, энергодисперсионные детекторы не обладают энергетическим разрешением, достаточным, чтобы предотвратить наложение характеристических линий различных элементов. В литературе описана возможность деконволюции рентгеновских спектров, которые позволяют разделять наложившиеся характеристические линии, однако точность разделения характеристических пиков элементов оставляет желать лучшего. Кроме того, в литературе не описано методик сверхвысокого разрешения, позволяющих превосходить энергетическое разрешение спектрометра за счет последующей обработки спектра.

Всё это не позволяет создавать эффективные, быстродействующие, точные системы аналитического контроля сыпучих и кусковых материалов, непосредственно в технологическом потоке.

В лаборатории ТекТерра ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова в настоящее время разрабатывается методика деконволюции спектров, которая позволит повысить точность качественного и количественного определения элементного состава сыпучих материалов, находящихся непосредственно на ленте конвейера.

### **Список литературы**

1. Овчаренко Е.Я. Построение автоматизированных систем аналитического контроля процессов обогащения. М.: Недра, 1987. 158 с.
2. Hassell D.C. Process analytical chemistry for spectroscopist/ Bowman E.M. //Appl. Spectrosc. 1998. V. 52. No. 1. P. 18A-29A.
3. Иеллепеди Р., Кохлер А., Бонвин Д. Контроль технологического процесса и качества продукции в производстве алюминия с использованием рентгенофлуоресцентного, рентгенодифракционного спектрометра ARL9800S XRF-XRD // Заводская лаборатория. 1998. Т. 64. No 12. С. 60-64.
4. Ymasaki H. A off-line analysis ad on-line analysis/ J. Soc. Instrum. and Contr./ Eng. 1988. V. 27. No. 11. P. 961-967.
5. Clarke J.R.P. Sampling for process analysis/ Anal. Proc. 1987. V. 24. No. 7. P. 210.159
6. Основной источник погрешностей при рентгенофлуоресцентном анализе железорудных смесей/ Ушеров А.И., Алов Н.В., Волков А.И., Ишметьев Е.Н., Полушкин М.Е., Вдовин К.Н., Ушерова Е.В., Шипилова Н.А.// Заводская лаборатория. 2009. Т. 75. No 3. С. 25-26.
7. Bloch MJ.-P., Sullens S.S.A. L'automatisation de processus analytique/ Bull.ARPEA. 1990. V. 26. No. 160. P. 5-8.
8. Automatische probenahme fur laboranalysen/ Entsorg. Prax. 1995. No. 12. P.60.
9. Marchett G. Sistemi automatici ed analizzatori on-line in zuccherificio/ Ind.Saccarif. Ital. 1989. V. 82. No. 6. P. 221-234.
10. Automated laboratory/ Chem. Brit. 1996. V. 32. No. 3. P. 87.

11. Starzec A. An automated energy dispersive (EDXRF) analyzer/ Lankosz M., Szostek L.// *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E: Nucl. Geophys.* 1990. V. 4. No. 3. P. 365-369.
12. Clarke J.R.P. A review of on-line analysis/ *Analyt. Chim. Acta* 1986. V. 190. Ng. 1. P. 1-11.
13. Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. Современная автоматизированная аппаратура рентгеноспектрального анализа // Л.: ЛДНТП, 1988. 24 с.
14. Sokolov A.D., Docenko D., Bliakher E., Shirokobrod O., Koskinen J. On-line analysis of chrome-iron ores on a conveyor belt using x-ray fluorescence analysis, *X-Ray Spectrom.* // 2005. V. 34. P. 456-459.
15. Состояние автоматизированного рентгенофлуоресцентного анализа и его применение в аналитическом контроле/ Никольский А.П., Афонин В.П., Верховский Б.И., Межевич А.Н.// *Журнал аналитической химии.* 1982. Т. 37. № 2. С. 327-337.
16. Никольский А.П., Замараев В.П., Бердичевский Г.В. Автоматизированный экспресс-контроль состава материалов в чёрной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 104 с.
17. US Patent 4861553. Automatic sampling system/ Mawhirt J.A., Cantatore L., DiFlora J.E., McCandless W.J.C., Marvin T., 1989.
18. Константинов Н.Я., Кочмола Н.М., Долина Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный экспресс-анализ железорудного сырья // *Черметинформация. Сер. 2. Обогащение руд.* Вып. 1. 1979. 24 с.
19. Непрерывный рентгенофлуоресцентный анализ железорудных смесей в производстве агломерата/ Алов Н.В., Волков А.И., Ушеров А.И., Интметьев Е.Н., Ушерова Е.В. // *Журнал аналитической химии.* 2010. Т. 65. № 2. С. 173-177.
20. Непрерывный контроль химического состава сульфидной медно-цинковой руды/ А.И. Ушеров, Е.Н. Ишметьев, А.Г. Ляпин, А.В. Ямщиков, А.М. Цыгалов// *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* №4. 2014. Т80. С 69-73.
21. Tillman D., Duong D. Managing slagging at Monroe Power Plant using on-line coal analysis and fuel blending/ // *Fuel Proc. Techn.* 2007. V. 88. No. 11-12. P. 1094-1098.
22. Strüder L, High resolution imaging X-ray spectrometers, *Nucl Instrum Meth A* 454, 73–113 (2000)
23. Гришин И.А., Князбаев Ж.А. Исследование режимов обогащения тонких классов хромовых руд флотационным методом // *Актуальные проблемы горного дела.* 2018. №2 (6). С. 42-45.
24. Frank M. Cryogenic detectors and their application to X-ray fluorescence analysis./ Friedrich S, Höhne J, Jochum J// *J X-ray Sci Technol* 11, 83–112 (2003).
25. Rossington CS. A direct comparison of Ge Na Si(Li) detectors in the 2–20 keV range./ Giauque RD, Jaklevic JM// *IEEE Trans Nucl Sci* 39(No. 4), 570–576 (1992).
26. Leutenegger P., et al., Silicon drift detectors as radiation monitor for x-, gamma rays and particle/ *Proc SPIE* 4012, 579 (2000).
27. Gauthier C., et al., A high-resolution silicon drift chamber for X-ray spectroscopy/ *Nucl Instrum Meth A* 349, 258 (1994).
28. Lechner P., et al., Multichannel silicon drift detectors for X-ray spectroscopy/ *Proc SPIE* 4012, 592 (2000).

#### Сведения об авторах

**Гришин Игорь Анатольевич** – канд. техн. наук, доц, зав. кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: [igorgri@mail.ru](mailto:igorgri@mail.ru)

УДК 622.7

## АГЛОМЕРАЦИОННО-СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА

Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А., Александрова Т.Н.

**Аннотация.** В работе представлены результаты по исследованию извлечения благородных металлов из эфельных отвалов на основе разработанной агломерационно-сорбционной технологии. Актуальность работы обусловлена необходимостью вовлечения в переработку руд с низким содержанием золота для удовлетворения растущего спроса. Разработанная технология представляет собой комбинирование флотационных методов обогащения и сорбции ценных компонентов на сорбент после перевода их в жидкую фазу. В работе представлено обоснование реагентного режима флотационного извлечения ценных компонентов.

**Ключевые слова:** флотационное обогащение, эфельные отвалы, тонкодисперсное золото, сорбент, реагентный режим.

**Введение**

В России на сегодняшний день качество минерального сырья разрабатываемых и подготавливаемых месторождений постоянно снижается. Использование традиционных технологий для переработки таких руд малоэффективно, что и обуславливает низкую рентабельность их освоения и переработки. В этой связи встаёт необходимость разработки технологий, способных вовлечь в переработку руды, имеющие сложный вещественный состав и тонкодисперсную структуру [1, 2].

Наиболее перспективным методом обогащения таких руд является флотация с большим потенциалом для возможной интенсификации процесса и комбинирования его с методами выщелачивания. Работы ведущих ученых в области флотационного обогащения направлены на разработку инновационных и эффективных способов извлечения благородных металлов из минерального сырья различного генезиса [3-6].

Примером может служить сорбция благородных металлов при их выщелачивании активированными сорбентами. После чего сорбент может быть отделен для конечной стадии получения благородных металлов флотацией. Комбинирование этих процессов позволяет повысить извлечение благородных металлов и значительно снизить затраты на переработку бедных руд.

Целью данного исследования являлась разработка агломерационно-сорбционной технологии извлечения золота из эфельных отвалов. В качестве объекта исследования были использованы пробы золотоносных эфельных отвалов. Под эфелями понимают мелкие лёгкие фракции материала, вымываемые водой с поверхностей залежей массива, как россыпных месторождений, так и отходов их обогащения [7].

**Объект и методики исследования**

В исследуемом материале благороднометалльные включения преимущественно представлены в тонкодисперсной форме и тонко вкраплены в породообразующие минералы. Таким образом, выбор объекта исследования обусловлен возможностью извлечения тонкодисперсных форм благородных металлов за счет возможности их перевода в жидкую фазу [8, 9]. Использование современных реагентов для выщелачивания позволит перевести в раствор значительное количество благороднометалльных включений для дальнейшего их извлечения посредством сорбции на активированный сорбент и флотационного извлечения сорбента в концентрат. В качестве сорбента в данной работе был выбран активированный уголь. Активация сорбента проводилась посредством перемешивания с раствором трибутилового эфира фосфорной кислоты.

### Результаты и обсуждение

С целью изучения распределения элементов по классам крупности проба рассеяна и каждый класс подвергнут рентгенофлуоресцентному анализу. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные содержания элементов в различных классах крупности

Крупность класса $d$ , мм	Содержания элементов в классах крупности, %						
	Si	Fe	K	Ca	Ti	Ag/Au	Zr
-3+2	26,00	56,14	2,65	10,35	0,89	0,00	0,11
-2+1,6	29,99	16,28	3,55	3,92	0,64	0,00	0,05
-1,6+0,8	37,08	3,09	3,00	2,06	0,60	0,00	0,00
-0,8+0,5	37,54	7,59	3,91	1,51	0,40	0,10	0,00
-0,5+0,4	37,39	5,67	4,97	1,50	1,24	0,00	0,00
-0,4+0,315	28,86	11,44	8,03	3,40	3,17	0,00	0,33
-0,315+0,25	51,93	21,91	14,33	5,84	3,65	0,10	0,34
-0,25+0,2	40,23	32,35	14,07	5,21	3,80	0,31	0,45
-0,2+0,14	24,95	17,97	3,39	1,70	6,62	0,00	0,54
-0,14+0,1	24,67	16,59	4,83	2,28	5,27	0,00	1,85
-0,1+0	14,34	26,42	3,74	3,70	7,24	0,00	5,18

В ходе анализа данных, представленных в табл. 1, установлено присутствие золота в классах крупности -0,8+0,5 мм, -0,315+0,25 мм, -0,25+0,2 мм. Также для класса крупности -0,25+0,2 мм установлено одно из наибольших содержаний кремния, что свидетельствует о высоком содержании в этом классе кремнийсодержащих минералов. Анализ полученных данных позволяет установить присутствие золота в классах крупности -800+500 мкм, -315+250 мкм и -250+200 мкм. Обнаруженное с применением рентгенофлуоресцентного исследования золото находится в свободной форме, однако его содержание достаточно мало, в связи с чем применение стандартных методов извлечения золота, таких, например, как гравитационные методы, не будет эффективным. Наиболее перспективным способом извлечения тонкодисперсного золота является перевод его в жидкую фазу и сорбция его на активированный сорбент с целью его дальнейшего флотационного извлечения.

Для подтверждения возможности извлечения благородных металлов агломерационно-сорбционным способом было проведено экспериментальное исследование флотационного извлечения активированного сорбента после его контакта с продуктивным раствором в течение 30 минут.

Активация сорбента проводилась путем обработки раствором трибутилового эфира фосфорной кислоты из-за его способности экстрагировать ионные и ультрадисперсные формы благородных металлов [10-14]. Активация проводилась в течение 8-12 часов при комнатной температуре. Полученный раствор отфильтровывался с последующей сушкой твердой фазы.

Для извлечения активированного сорбента были использованы триоктиламин (ТОА), изоамиловый спирт, керосин и ряд реагентов, понижающих поверхностное натяжение на границе раздела вода-воздух, используемых при флотации в качестве вспенивателей. Для подачи в процесс таких реагентов, как керосин и ТОА, был использован диспергатор для подачи реагентов в виде эмульсии. Расход вспенивателей составлял 100 г/т, расход керосина и ТОА составлял 400 г/т. Результаты извлечения золота во флотационный концентрат в зависимости от реагентного режима представлены на рис. 1.

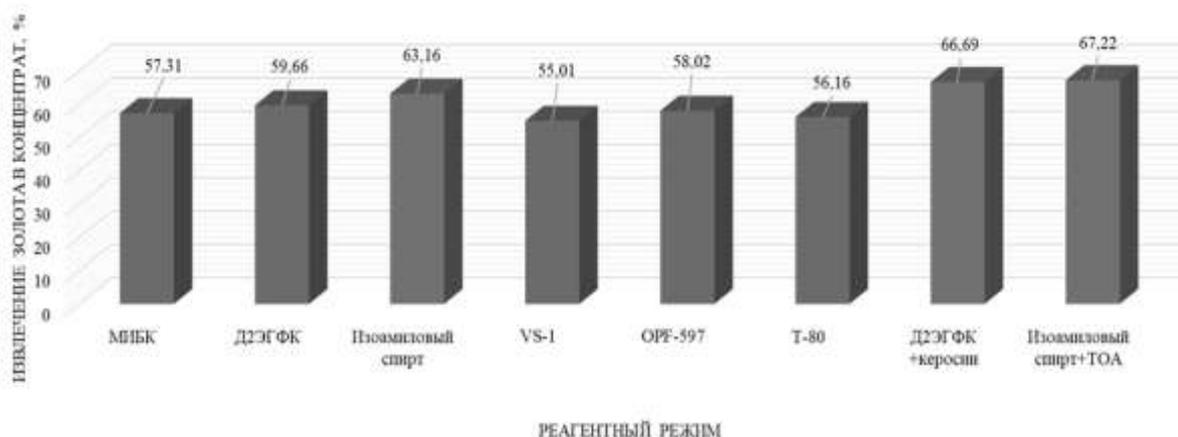


Рис. 1. Извлечение золота в концентрат в зависимости от реагентного режима

На основании анализа данных (см. рис.1) можно сделать вывод, что наибольшее извлечение золота получено при использовании в качестве реагентов: изоамилового спирта, Д2ЭГФК+керосина и изоамилового спирта+ТОА. Наибольшее извлечение золота в концентрат, равное 67,22 %, получено при использовании изоамилового спирта с расходом 100 г/т и эмульсии ТОА с расходом 400 г/т.

Для повышения извлечения золота в концентрат проведено углубленное исследование реагентного режима с применением факторного планирования. В качестве выходного параметра выбрано извлечение золота в концентрат. Варьируемыми факторами были выбраны расход собирателя ТОА и вспенивателя изоамилового спирта. Постоянным фактором выбрано время процесса флотации. Факторы и их уровни варьирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни варьируемых факторов для плана эксперимента

Фактор	Обозначение	Уровни факторов		
		-1	0	1
Расход собирателя, г/т	X <sub>4</sub>	300	400	500
Расход вспенивателя, г/т	X <sub>5</sub>	75	100	125
Время флотации, мин	X <sub>6</sub>	10	10	10

Графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований представлена на рис. 2.

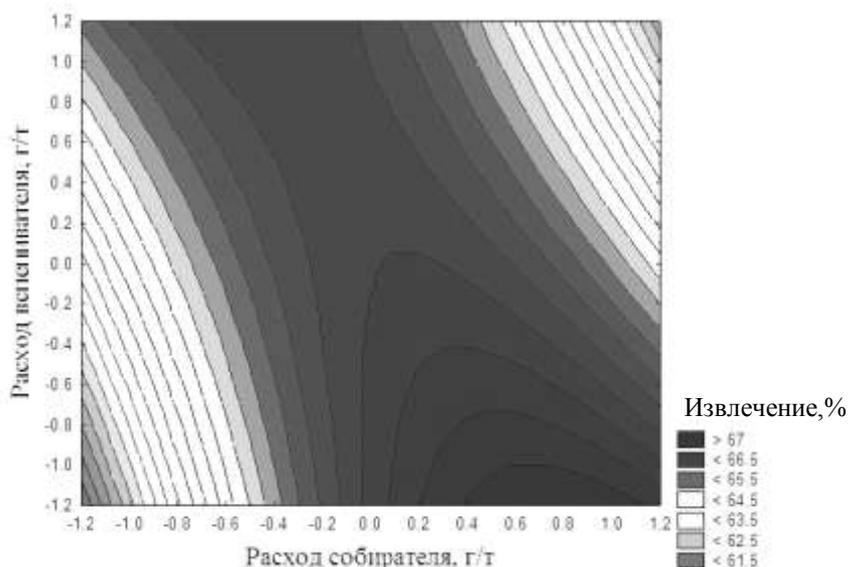


Рис. 2. Значения извлечения золота в концентрат в зависимости от реагентного режима (расхода собирателя и вспенивателя)

Полученные данные были обработаны с получением математической модели, которая позволила адекватно описать зависимость извлечения золота в концентрат флотации от расхода собирателя и вспенивателя:

$$\varepsilon_{Au} = 66,2356 + 0,4967 \cdot X_4 - 0,165 \cdot X_5 - 1,5533 \cdot X_4^2 - 1,55 \cdot X_4 \cdot X_5 - 0,0683 \cdot X_5^2,$$

где  $\varepsilon_{Au}$  – извлечение золота в концентрат флотации;

$X_4$  – уровень фактора – расход собирателя ТОА, г/т;

$X_5$  – уровень фактора – расход вспенивателя изоамилового спирта, г/т.

Анализ полученных данных позволил определить, что максимальное значение извлечения золота в концентрат составляет 69,88 % при расходе собирателя ТОА 455 г/т и вспенивателя изоамилового спирта 75 г/т.

### Заключение

В работе представлены результаты по исследованию извлечения золота из эфельных отвалов на основе разработанной агломерационно-сорбционной технологии. В поисковых опытах наибольшее значение извлечения составило 67,22 % при использовании изоамилового спирта с расходом 100 г/т и эмульсии ТОА с расходом 400 г/т. Углубленное исследование реагентного режима, состоящее в подборе значений расходов реагентов для достижения максимального извлечения золота в концентрат, показало, что максимальное значение извлечения золота в концентрат составляет 69,88 % при расходе собирателя ТОА 455 г/т и вспенивателя изоамилового спирта 75 г/т. В результате исследования разработана технология агломерационно-сорбционного извлечения золота, включающая в себя перевод золота в жидкую фазу с применением реагентов для выщелачивания, активацию сорбента с применением трибутилового эфира фосфорной кислоты в течение 8-12 часов, сорбции золота на активированный сорбент и последующее флотационное извлечение сорбента с применением разработанного и обоснованного реагентного режима.

### Список литературы

1. Чантурия В. А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. №. 11. С. 7-13.
2. Van Berkel R., Narayanaswamy V. Sustainability as a framework for innovation in minerals processing // Green Processing Conference. 2004. С. 10-12.
3. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Чантурия Е. Л. Основные направления решения проблем комплексной переработки пиритных хвостов флотации медно-цинковых руд // Цветные металлы. 2011. №. 12. С. 20-26.
4. Чантурия В. А., Недосекина Т. В., Гапчич А. О. Повышение селективности процесса флотации золота на основе применения новых реагентов-собирателей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. №. 6. С. 106-115.
5. O'Connor C. On the management of gangue minerals in the flotation of platinum group minerals // Mining, Metallurgy & Exploration. 2019. Т. 36. №. 1. С. 55-62.
6. Nanthakumar B., Pickles C. A., Kelebek S. Microwave pretreatment of a double refractory gold ore // Minerals Engineering. 2007. Т. 20. №. 11. С. 1109-1119.
7. Александрова Т. Н., Гурман М.А., Мамаев Ю.А. Анализ потерь благородных металлов и рациональные методы их снижения при разработке россыпных месторождений // Цветные металлы. 2014. №. 5. С. 11-15.
8. Худояров С. Р. Исследования безцианистых методов извлечения золота из золотосодержащего сырья // Результаты современных научных исследований и разработок. 2019. С. 67-69.
9. Zamboulis, D., Peleka, E. N., Lazaridis, N. K., & Matis, K. A. (2011). Metal ion separation and recovery from environmental sources using various flotation and sorption techniques. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 86(3), 335-344.

10. Aleksandrova T. N., Heide G., Afanasova A. V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data //Записки Горного института. – 2019. – Т. 235.
11. Ivanik S. A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes //Записки Горного института. – 2020. – Т. 242.
12. Chen T. T., Cabri L. J., Dutrizac J. E. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues //Jom. – 2002. – Т. 54. – №. 12. – С. 20-22.
13. Ospina-Correa J. D. et al. Process mineralogy of refractory gold ore in thiosulfate solutions //Hydrometallurgy. – 2018. – Т. 182. – С. 104-113.
14. Грушова Е. И., Ушева О. А., Аднан А. Р. А. Использование метил-трет-бутилового эфира в экстракционных процессах переработки масляных фракций нефти //Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2019. – №. 1 (217).
15. Gökelma M. A review on alternative gold recovery re-agents to cyanide //Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2016. – Т. 4. – №. 08. – С. 8.

#### **Сведения об авторах**

**Афанасова Анастасия Валерьевна** – канд. техн. наук, ассистент кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: [Afanasova\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Afanasova_AV@pers.spmi.ru)

**Бабенко Татьяна Александровна** – аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: [s205059@stud.spmi.ru](mailto:s205059@stud.spmi.ru)

**Кузнецов Валентин Вадимович** – аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: [s205058@stud.spmi.ru](mailto:s205058@stud.spmi.ru)

**Александрова Татьяна Николаевна** – д-р. техн. наук., профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: [Aleksandrova\\_TN@pers.spmi.ru](mailto:Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru)