ФИЦ КНЦ РАН

- НАУКИ О ЗЕМЛЕ
- ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ
- КНИГОИЗДАНИЕ
- ЮБИЛЯРЫ

ВЕСТНИК
Кольского научного центра РАН

4/2019

4/2019 (11)
Издается с декабря 2009 года
DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4
ISSN 2307-5228

Российская Академия Наук

ВЕСТНИК
Кольского научного центра РАН

Научно-информационный журнал
Основан в 2009 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»

Главный редактор, председатель Редакционного совета
С. В. КРИВОВИЧЕВ, чл.-корр. РАН, д. г.-м. н., проф.

Заместитель главного редактора
В. К. Жиров, чл.-корр.
Ответственный секретарь
А. С. Карпов, к. т. н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В. А. МАСЛОБОЕВ, д. т. н., руководитель редколлегии;
Н. К. БЕЛИШЕВА, д. б. н.;
Е. А. БОРОВИЧЕВ; к. б. н.;
О. Б. ГОНТАРЬ, к. б. н. (ПАБСИ КНЦ РАН);
П. Б. ГРОМОВ, к. т. н.;
В. Е. ИВАНОВ, д. ф.-м. н.;
А. А. КОЗЫРЕВ, д. т. н., проф., заслуженный деятель науки РФ;
В. В. МЕГОРСКИЙ, к. м. н.;
Д. В. МОИСЕЕВ, к. г. н. (ММБИ КНЦ РАН);
А. Г. ОЛЕЙНИК, д. т. н.;
Т. В. РУНДКВИСТ, к. г.-м. н.;
С. В. ФЕДОСЕЕВ, д. э. н.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Б. В. ЕФИМОВ, д. т. н., проф., заслуженный энергетик РФ;
Б. В. КОЗЕЛОВ, д. ф.-м. н. (ПГИ);
Н. Е. КОЗЛОВ, д. г.-м. н., проф.;
С. А. КУЗНЕЦОВ, д. х. н. заслуженный металлург РФ;
Ф. Д. ЛАРИЧКИН, д. э. н., проф., заслуженный экономист РФ;
С. В. ЛУКИЧЁВ, д. т. н.;
Д. В. МАКАРОВ, д. т. н.;
Г. Г. МАТИШОВ, академик РАН, д. г. н., проф. (ММБИ КНЦ РАН);
А. И. НИКОЛАЕВ, чл.-корр. РАН, д. х. н., проф., заслуженный деятель науки РФ;
В. А. ПУТИЛОВ, д. т. н., проф.; заслуженный деятель науки РФ;
И. А. РАЗУМОВА, д. и. н., проф.

Научное издание

Ответственный редактор А. С. Менделева
Редактор Ю. Н. Еремеева (англ. яз.)
Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 28.12.2019.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 13.02. Заказ № 50 Тираж 300 экз.

Адрес учредителя, издателя и типографии:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук»
184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана,14

Печатается по решению Ученого совета ФИЦ КНЦ РАН.

Публикация статей не является свидетельством того, что издатель разделяет мнения их авторов; ответственность за суждения и оценки, выраженные в публикуемых статьях, лежит исключительно на авторах.

184209, г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана, 14
Тел.: 8-81555-79-754
E-mail: a.mendeleva@ksc.ru

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

С требованиями к авторам статей, редакционной политикой журнала, а также с архивом выпущенных номеров можно ознакомиться на сайте журнала: http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Александрова Т. Н., Кузнецов В. В.
Совершенствование технологии переработки золотоносной сульфидной руды с использованием компьютерного моделирования…….. 5

Калашник Н. А.
4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»……... 10

Калюжный И. Л., Лавров С. А.
Теплофизические свойства деятельного слоя болот Кольского полуострова……... 16

Ковшов С. В., Пасынков А. В.
Ресурсосберегающие технологии пылеподавления и снижения вероятности самовозгорания породы во внутренних отвалах и штабелях при ведении открытых горных работ…… 29

Корчевенков С. А., Герасименко С. И.
Современные подходы к переработке оловосодержащего сырья…… 34

Наумов В. А., Гусак С. А.
Накопление гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu в реакторах атомных станций малой мощности..... 40

Орлова А. В., Таранов В. А.
Общие критерии выбора и виды технологических схем переработки медных руд…… 50

Романенко С. А. Ушаков Е. К.
Исследование технологической изменчивости медно-цинковых колчеданных пирротинсодержащих руд на примере Приорского месторождения…… 56

Ромашев А. О., Калмыкова Т. Д.
Идентификация кинетических зависимостей с целью оптимизации процесса флотационного обогащения…… 62

Тимощик О. А., Щелокова Е. А., Черноусенко Е. В., Касиков А. Г.
Комбинированный способ комплексной переработки отвального шлака комбината «Печенганикель»…… 69

Федоров В. И.
Проблемы обеспечения энергобезопасности арктических районов Якутии на основе потенциального освоения местной сырьевой базы…….. 75

Широносова Г. П., Прокопьев И. Р.
Оценка роли сульфатной серы в транспорте лантаноидов окисленными флюидами при формировании месторождений с редкоземельной минерализацией (термодинамическое моделирование)…… 80

Яковлева Т. А, Управителева А. А, Абурова В. А.
Исследование возможности получения высококачественных концентратов из окисленных железистых кварцитов методами магнитной сепарации…… 92

ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ……..... 98

КНИГОИЗДАНИЕ……..... 105

ЮБИЛЯРЫ……..... 108

4/2019 (11)
Published since December 2009
DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4
ISSN 2307-5228

Russian Academy of Sciences

HERALD

of the Kola Science Centre of RAS

Publisher — Federal State Budgetary Science Institution Federal Research Centre "Kola Science Centre of RAS"

Editor-in-Chief and Chairman of the Editorial Council
S. V. KRIVOVICHEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.

Vice Editor-in-Chief
V. K. Zhirov, Corr. Member of RAS

Responsible Secretary
A. S. Karpov, PhD (Eng.)

EDITORIAL BOARD

V. A. MASLOBOEV, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Editorial Board;
N. K. BELISHEVA, Dr. Sci. (Bio);
E. A. BOROVICHEV, PhD (Bio);
O. B. GONTAR', PhD (Bio), PABGI KSC RAS;
P. B. GROMOV, PhD (Eng.);
V. E. IVANOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.);
A. A. KOZYREV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
V. V. MEGORSKY, PhD (Medicine);
D. V. MOISEEV, PhD (Geography), MMBI KSC RAS;
A. G. OLEJNIK, Dr. Sci. (Eng.);
T. V. RUNDKVIST, PhD (Geol. & Mineral.);
S. V. FEDOSEEV, Dr. Sci. (Econ.)

EDITORIAL COUNCIL

B. V. EFIMOV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Power Engineer of the RF, Prof.;
B. V. KOZELOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.), PGI;
N. E. KOZLOV, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.;
S. A. KUZNETZOV, Dr. Sci. (Chem.), Honoured Metallurgist of the RF;
F. D. LARICHKIN, Dr. Sci. (Econ.), Honoured Economist of the RF, Prof.;
S. V. LUKICHEV, Dr. Sci. (Eng.);
D. V. MAKAROV, Dr. Sci. (Eng.);
G. G. MATISHOV, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geography), Prof., MMBI KSC RAS;
A. I. NIKOLAEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Chem.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
V. A. PUTILOV, Dr. Sci. (Eng.), Prof.;
I. A. RAZUMOVA, Dr. Sci. (History), Prof.

Scientific Publication

Executive Editor A. S. Mendeleva
Editor Yu. N. Yeremeyeva (English)
Technical Editor V. Yu. Zhiganov

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009.

Published by decision of the Academic Council of FRC KSC RAS.

Statements and opinions expressed in the articles are those of the author(s) and not necessarily those of the Publisher. The Publisher disclaims any responsibility or liability for the published materials.

184209, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk Oblast.
Tel. 8-81555-79-754.
E-mail: a.mendeleva@ksc.ru

Information for authors, our policy and archive:
http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/.

© Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Centre "Kola Science Centre of RAS", 2019

CONTENTS

EARTH SCIENCES

Tatyana N. Aleksandrova, Valentin V. Kuznetsov
Gold Bearing Sulphide Ores Processing Technology Enhancement by Computer Modelling……..... 5

Nadezhda A. Kalashnik
4D Simulation of Soil Consolidation of Tailings Storage Facilities of JSC “Kovdorsky GOK”…..…… 10

Igor L. Kalyuzhny, Sergey A. Lavrov
Thermophysical Properties of the Active Layer of the Kola Peninsula Bogs…… 16

Stanislav V. Kovshov, Andrei V. Pasynkov
Resource-Saving Technologies for Dust Suppression and Reducing the Probability of Spontaneous Combustion of Rocks in Internal Dumps and Stacks when Conducting Open-Pit Mining Operations…….. 29

Stepan A. Korchevenkov, Sergey I. Gerasimenko
Modern Approaches to the Processing of Tin-Containing Raw Materials…… 34

Vadim A. Naumov, Sergey A. Gusak
Accumulation of Gamma-Emitting Radionuclides ^{134}Cs and ^{154}Eu in Reactors of Small Nuclear Power Plants..... 40

Anna V. Orlova, Vadim A. Taranov
General Selection Criteria and Types of Technological Schemes for the Processing of Copper Ores……. 50

Sergey A. Romanenko, Egor K. Ushakov
The Study of Technological Variability of Copper-Zinc Pyrite Pyrrhotite-Containing Ores on the Example of the Priorskoye Deposit……... 56

Artem O. Romashev,Tatyana D. Kalmykova
Identification of Kinetic Dependencies in order to Optimize the Flotation Enrichment Process……. 62

Olga A. Timoshchik, Elena A. Shchelokova, Elena V. Chernousenko, Alexander G. Kasikov
Combined Method of Complex Processing of Waste Slag of Pechenganikel Plant…… 69

Vladislav I. Fedorov
Energy Security Problems in the Arctic Areas of Yakutia Based on Potential Development of the Local Raw Material Base……. 75

Galina P. Shironosova, Ilya R. Prokopyev
Estimation of the Role of Sulfate Sulfur in the Transport of Lanthanides by Oxidized Fluids in the Formation of Deposits with Rare Earth Mineralization (Thermodynamic Modeling)..... 80

Tatiana A. Iakovleva, Anna A. Upraviteleva, Valeria A. Aburova
Study of the Possibility of Obtaining High-Quality Concentrates from Oxidized Ferruginous Quartzites by Magnetic Separation Methods…… 92

CONFERENCES..... 98

NEW BOOKS……..... 105

ANNIVERSARIES……..... 108

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.5-9
УДК 622.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОНОСНОЙ СУЛЬФИДНОЙ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Т. Н. Александрова, В. В. Кузнецов
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Представлены результаты исследования возможности повышения эффективности флотации золотосодержащих сульфидов с использованием окислителей. Выполнены экспериментально-теоретические исследования по флотационной селекции пирита и арсенопирита. Оценка эффективности технологического процесса проводилась путем анализа влияния Eh-потенциала и скорости воздушного потока на извлечение сульфидных минералов флотацией с использованием программного пакета HSC Chemistry 9.0.

Ключевые слова:
моделирование, сульфидная флотация, окислительно-восстановительный потенциал, упорные руды.

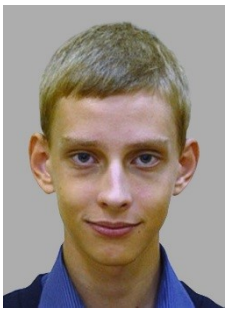
GOLD BEARING SULPHIDE ORES PROCESSING TECHNOLOGY ENHANCEMENT BY COMPUTER MODELLING

Tatyana N. Aleksandrova, Valentin V. Kuznetsov
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstarct

The article presents the results of a study on the elevation of gold-bearing sulphide flotation efficiency by using oxidants. Experimental-theoretical studies were conducted in the field of selective flotation of pyrite and arsenopyrite. Evaluation of process efficiency was conducted by analysis of Eh-potential and air-flow rate influence on the sulphide minerals recovery in the concentrate with HSC Chemistry 9.0 software application.

Keywords:
modeling, sulfide flotation, red-ox potential, refractory ores.



Введение

Промышленность большинства стран мира сталкивается с проблемой повсеместного истощения запасов богатых металлов, поэтому их добыча становится все более трудоемкой и, что немаловажно, дорогостоящей задачей. Таким образом, возрастает актуальность извлечения металлов из руд, где они представлены в виде включений и не могут быть извлечены традиционными методами. Переработка бедных руд может быть осуществлена путем изменения сложившихся методов обогащения посредством добавления новых методов работы или пересмотра оптимальных условий для применения данных операций [1, 2].

Цель данной работы — исследование возможности селекции золотосодержащих сульфидов (пирит и арсенопирит) с использованием окислителей на стадии флотации. Специфика минерализации упорных золотоносных руд заключается в том, что золото находится не в свободной форме, а наоборот, оно тесно ассоциировано с сульфидами и представлено в виде либо мелких самородных включений, либо изоморфных замещений в кристаллической решетке сульфидов.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00096).

При коллективной сульфидной флотации таких руд в концентрат попадают различные по золотоносности сульфидные минералы. Это создает серьезные проблемы при дальнейшей гидрометаллургической переработке данного сырья.

Одним из решений этой проблемы может быть селективная флотация пирита-арсенопирита путем разделения коллективного концентрата на продукты однородного минерального состава. Для разделения пирита и арсенопирита были использованы окислители, влияющие на флотационные свойства минералов посредством окисления поверхности минерала, что изменяет его флотируемость или вызывает окисление собирателя.

Обзор литературы

Повышение эффективности флотации за счет добавления окислителей может быть обусловлено несколькими принципиальными причинами.

Одна из них заключается в том, что окислитель вступает с минералом в гетерогенную химическую реакцию, образуя окисленную пленку на поверхности минерала. Образовавшаяся пленка изменяет поверхностные свойства минерала, что, в свою очередь, влияет на его извлечение флотацией.

Предполагая, что на поверхности минерала происходит химическая реакция, мы можем оценить процесс через вероятности образования различных продуктов этой реакции. Построив диаграмму Пурбе для диапазона pH, в котором происходит флотация и вовлеченных в процесс химических элементов, можем оценить вероятность окисления по ширине зоны существования продуктов окисления.

Моделирование состояния системы было выполнено в программном пакете HSC Chemistry 9.0. Построение диаграмм реализуется на основе данных базы термохимической информации для наиболее распространенных веществ, применяемых в химической отрасли. В базу данных записываются значения энтальпии (H), энтропии (S) и теплоемкости (C_p) элементов и составов. Это позволяет программе моделировать состояние системы для заданных диапазонов pH и Eh, а затем и определять устойчивые термодинамические формы существования элементов в системе [3]. Графическая визуализация построенных диаграмм приведена на рис. 1, 2.

Другая причина обусловлена тем, что в процессе окисления разрушаются химические связи сульфидов, что позволяет высвобождать сопутствующие полезные компоненты, заключенные в пространство кристаллической решетки минерала [4–6].

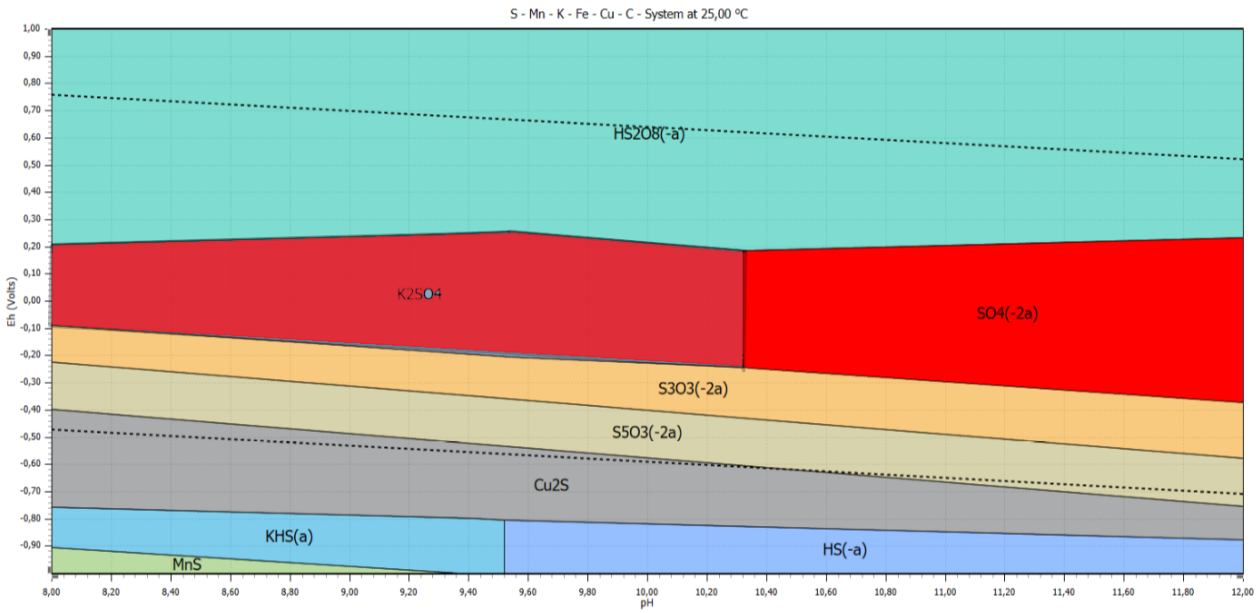


Рис. 1 Модель процесса флотации без применения окислителя

Fig. 1. Flotation model without oxidant application

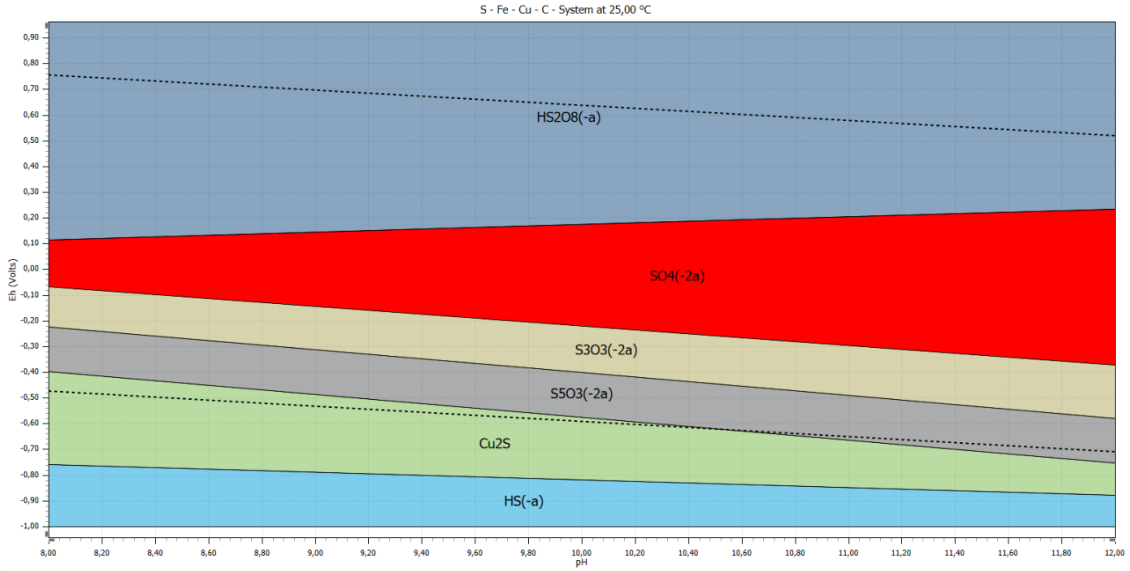


Рис. 2 Модель процесса флотации с применением окислителя

Fig. 2. Flotation model with oxidant application

Материалы и методы

Селективное разделение пирита и арсенопирита в процессе флотации возможно с использованием окислителей за счет изменения свойств поверхности путем окисления.

Для изучения влияния интенсивности аэрации на процесс количество расхода воздуха варьировали в пределах от 0,01 до 0,06 м^3/ч.

Рис. 3. Лабораторная флотомашина JK Batch Flotation Cell

Fig. 3. Laboratory flotation cell JK Batch Flotation Cell

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Монофракцию пирита измельчали в течение 15 мин при P80 = 0,80 мкм. Флотация полученного продукта длилась 4 мин. Выбор окислителя сделан на основе анализа литературы [5]. Для изучения влияния окислительно-восстановительного потенциала (Eh) на процесс флотации значения pH не выходили за пределы интервала 10,0–10,6. Исследования выполнялись на флотомашине JK Batch Flotation Cell (рис. 3).

Результаты и обсуждение

В ходе теоретического анализа установлено, что в случае флотации пирита с присутствием окислителей Eh должен находиться в диапазоне существования сульфатных ионов как основных продуктов окисления поверхности пирита и, следовательно, основных критериев высокой вероятности окисления. Критерием для сравнения результатов является область существования этих ионов. Установлено, что площадь сульфатных зон увеличивается на 7,16 % за счет образования растворимых сульфатов калия, являющихся продуктами окисления (см. рис. 1 и 2).

Результаты исследования влияния Eh-потенциала на извлечение монофракции пирита в пенный продукт представлены на рис. 4. При анализе влияния окислительно-восстановительного потенциала установлено, что, несмотря на теоретические результаты, наибольшие показатели выделения монофракций были получены для окислительно-восстановительных потенциалов, характерных для пограничной зоны существования сульфатных ионов. С итогами изучения влияния интенсивности аэрации на извлечение монофракции пирита можно ознакомиться в таблице.

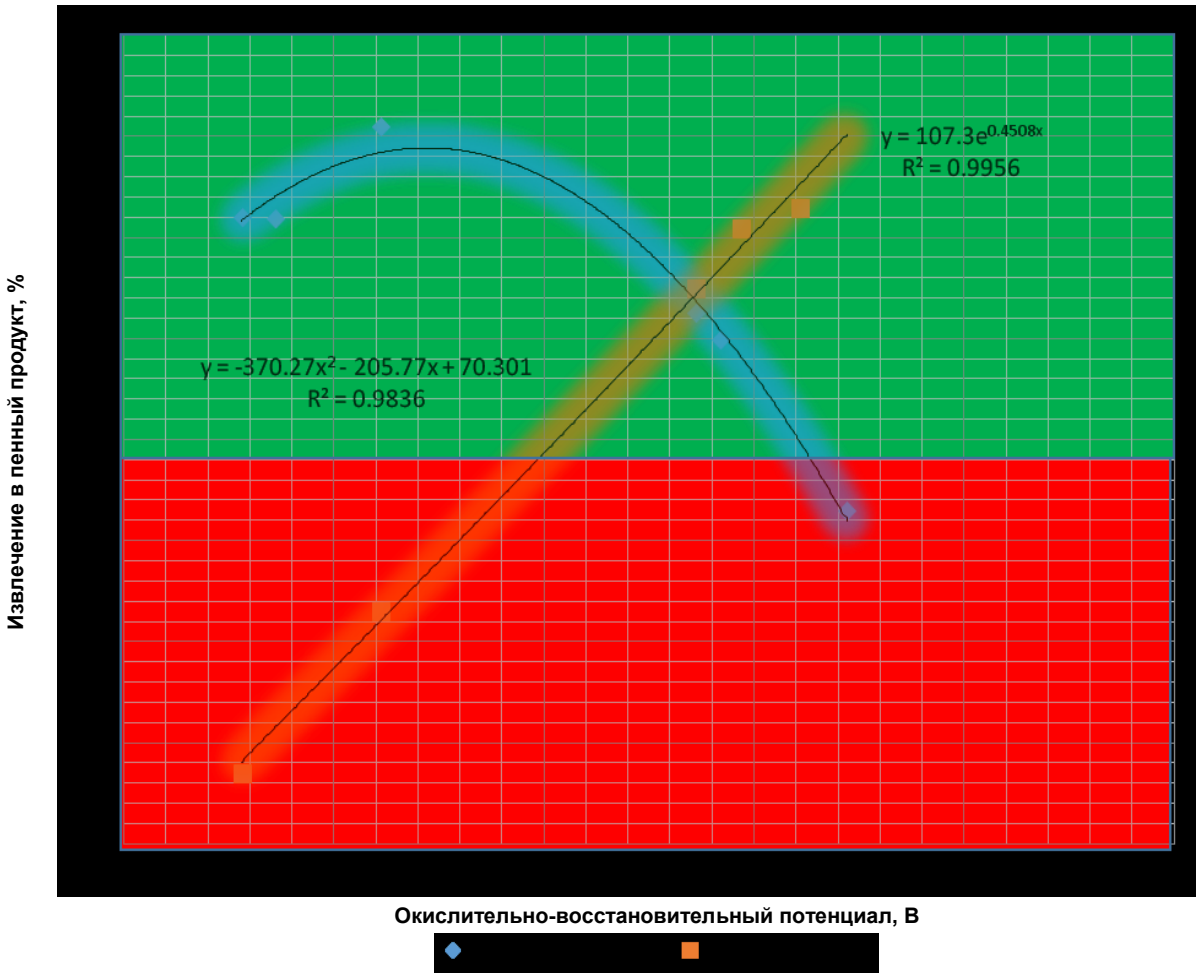


Рис. 4. Извлечение в пенный продукт монофракции пирита в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала среды

Fig. 4. Dependence of the extraction of pyrite monofraction into the foam product as a function of the redox potential of the medium

Извлечение монофракции пирита в концентрат в зависимости от интенсивности аэрации при разных реагентных режимах

Extraction of pyrite monofraction into a concentrate depending on aeration intensity nder different reagent conditions

Интенсивность аэрации, $м^3$/ч Aeration intensity, m^3/h	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Извлечение монофракции в концентрат при флотации без окислителя, % Extraction of monofraction into concentrate during flotation without an oxidizing agent, %	91,8	94,8	95,9	97,6	97,6	97,9
Извлечение монофракции в концентрат при флотации с окислителем, % The extraction of monofraction in concentrate during flotation with an oxidizing agent, %	97,6	97,8	97,9	98,2	98,1	98,5

В ходе исследования влияния интенсивности аэрации на процесс извлечения монофракции установлено, что интенсивность аэрации в присутствии окислителей оказывает меньшее влияние на извлечение пирита в концентрат, что можно объяснить аналогичными механизмами окисления сульфида кислородом при аэрации и в присутствии окислителя.

Заключение

Повышение эффективности и экологичности переработки сульфидных упорных золотосодержащих руд может быть достигнуто применением селективной флотацией пирита и арсенопирита. Реализация данного процесса возможна с использованием окислителей в ходе флотации, которые как изменяют поверхностные свойства минералов, так и способствуют большему раскрытию полезных компонентов.

Теоретическое обоснование повышения эффективности реализовано построением диаграмм Пурбе. В качестве критерия эффектиности флотации была выбрана вероятность образования сульфат-ионов как продуктов химической реакции, происходящей при окислении. Установлено что применение окислителей увеличивает вероятность окисления.

Экспериментальные исследования, проведенные на монофракции пирита, показали повышение эффективности его извлечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aleksandrova T. N., Heide G., Afanasova A. V*. Assessment of Refractory Gold-Bearing Ores Based on Interpretation of Thermal Analysis Data // J. Mining Institute. 2019. Vol. 235. P. 30–37. DOI: 10.31897.PMI.2019.1.30. **2.** *O'Connor C. T., Dunne R. C*. The Flotation of Gold Bearing Ores — a Review // Minerals Engineering. 1994. Vol. 7. No. 7. P. 839–849. **3.** *Antti Remes*. HSC Chemistry 9. Basic Course for Mineral Processing Applications. Outotec Minerals Processing — 2018. **4.** *Александрова Т. Н., Ромашев А. О., Семенихин Д. Н.* Минералого-технологические аспекты и перспективные методы интенсификации обогащения сульфидной золотосодержащей руды // Металлург. 2015. № 4. С. 53–59. **5.** *Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е*. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. М.: Руда и металлы, 2008. 272 с. **6.** *Александров А. В., Афанасова А. В., Крижановская Д. А*. Анализ термогравиметрических данных углеродсодержащих материалов для обоснования технологии переработки // Горн. информ.-аналит. бюлл. 2018. №. 12. С. 35–43. (Современные тенденции в обогащении природного и техногенного сырья различного минерального состава: [спец. вып. № 56]).

Сведения об авторах

Александрова Татьяна Николаевна — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: alexandrovat10@gmail.com
Кузнецов Валентин Вадимович — студент Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: arthurpraim@mail.ru

Author Affiliation

Tatyana N. Aleksandrova — Doctor of Sciences (Engineering), Prof., Head of the Mineral Processing Department of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: alexandrovat10@gmail.com
Valentin V. Kuznetsov — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: arthurpraim@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Александрова, Т. Н. Совершенствование технологии переработки золотоносной сульфидной руды с использованием компьютерного моделирования / *Т. Н. Александрова, В. В. Кузнецов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 5–9.

Author Affiliation

Aleksandrova Tatyana N., Kuznetsov Valentin V. Gold Bearing Sulphide Ores Processing Technology Enhancement by Computer Modelling. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 5–9. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.10-15
УДК 622’17:004.923

4D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩА АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»

Н. А. Калашник
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты

Аннотация

Приведены результаты 4D-моделирования (с учетом фактора времени) консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». Выявлены тенденции уплотнения грунтов насыпной дамбы и хвостовых отложений во времени в период до 80 дней. Установлено, что характер консолидации насыпных и намывных грунтов идентичен, но количественно различается. Обнаружена зависимость уплотнения грунтов насыпной и намывной частей ограждающей дамбы от времени консолидации, что предоставляет научно-техническую основу для оценки ее механического состояния и устойчивости и последующего наращивания ярусов дамбы.

Ключевые слова:
4D-моделирование, консолидация, хвостохранилище, дамба, устойчивость.

4D SIMULATION OF SOIL CONSOLIDATION OF TAILINGS STORAGE FACILITIES OF JSC “KOVDORSKY GOK”

Nadezhda A. Kalashnik
Mining Institute of FRC KSC RAS, Apatity

Abstract

The results of the 4D simulation (taking into account the time factor) of soil consolidation of the tailings storage facility of JSC “Kovdorsky GOK” are presented. Trends of compaction of soil of bulk dam and tail deposits in time up to 80 days have been revealed. It has been established that the character of consolidation of bulk and fill soils is identical, but quantifiably differs. The dependencies of soil compaction of the bulk and fill parts of the enclosing dam against the consolidation time have been identified, which provides a scientific and technical basis for assessing its mechanical condition and stability, and the subsequent growth of the dam tiers.

Keywords:
4D modeling, consolidation, tailings storage, dam, sustainability.

Введение

Строительство хвостохранилищ обогатительных фабрик горнорудных предприятий Кольского п-ова производилось, как правило, на относительно слабых грунтах (в оврагах или котловинах рек) [1]. При их эксплуатации гидрогеологический режим как в силу высокого уровня естественных грунтовых вод, так и постоянных водонасыщенных пульповых складирований хвостов обогатительных фабрик обусловливает формирование повышенного порового давления воды в грунтах всех гидротехнических сооружений хвостохранилища. В результате эффективное напряжение в грунтах оказывается низким и для надежной эксплуатации хвостохранилища и обеспечения устойчивости дамбы должны быть приняты периоды времени, в течение которых происходит промежуточное уплотнение грунтов за счет их консолидации [2, 3]. Вследствие консолидации, за счет уплотнения грунтов, избыточное поровое давление воды рассеивается и снижается, а грунт может приобрести «скелетную» жесткость, обеспечивающую сдвиговую прочность, необходимую для эксплуатации дамбы [4–6].

Для оценки степени консолидации грунтов и выявления зависимостей их уплотнения вследствие рассеивания избыточного порового давления в водонасыщенных грунтах хвостохранилища как функцию времени (автоматическая дискретизация по времени) в данной работе было выполнено компьютерное моделирование деформационно-фильтрационных

процессов (консолидация грунтов) с использованием программного комплекса PLAXIS 3D на примере хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». Моделирование процессов консолидации было выполнено с использованием программных модулей, позволяющих имитировать реалистичный процесс путем введения различных граничных условий для нагрузок и порового давления и заданием дополнительного параметра — временного интервала [7], то есть фактически было выполнено 4D-моделирование процессов консолидации грунтов. При этом исследовались закономерности изменения гидрогеомеханического состояния гидротехнической системы с течением времени от 1 до 80 дней.

Было выполнено сценарное моделирование 12 вариантов гидрогеомеханического состояния хвостохранилища:

- исходное состояние при текущих параметрах эксплуатации (1);
- повышение уровня водонасыщенных хвостовых отложений (2);
- последующая консолидация грунтов: в течение 1 дня (3), 2 дней (4), 3 дней (5), 5 дней (6), 10 дней (7), 15 дней (8), 20 дней (9), 30 дней (10), 50 дней (11), 80 дней (12).

Для проведения исследований в среде PLAXIS была создана 3D-модель фрагмента расположенного на подстилающем геологическом основании хвостохранилища, включающая ограждающую насыпную дамбу и намывные хвостовые отложения и адекватная геометрическим размерам, показанным на рис. 1. Для последующего анализа процессов уплотнения грунтов был выбран поперечный разрез (указан на рис. 1, в выноске). Параметры физико-механических характеристик грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающих пород геологического основания, используемые для расчетов, были приняты согласно работам [8–10].

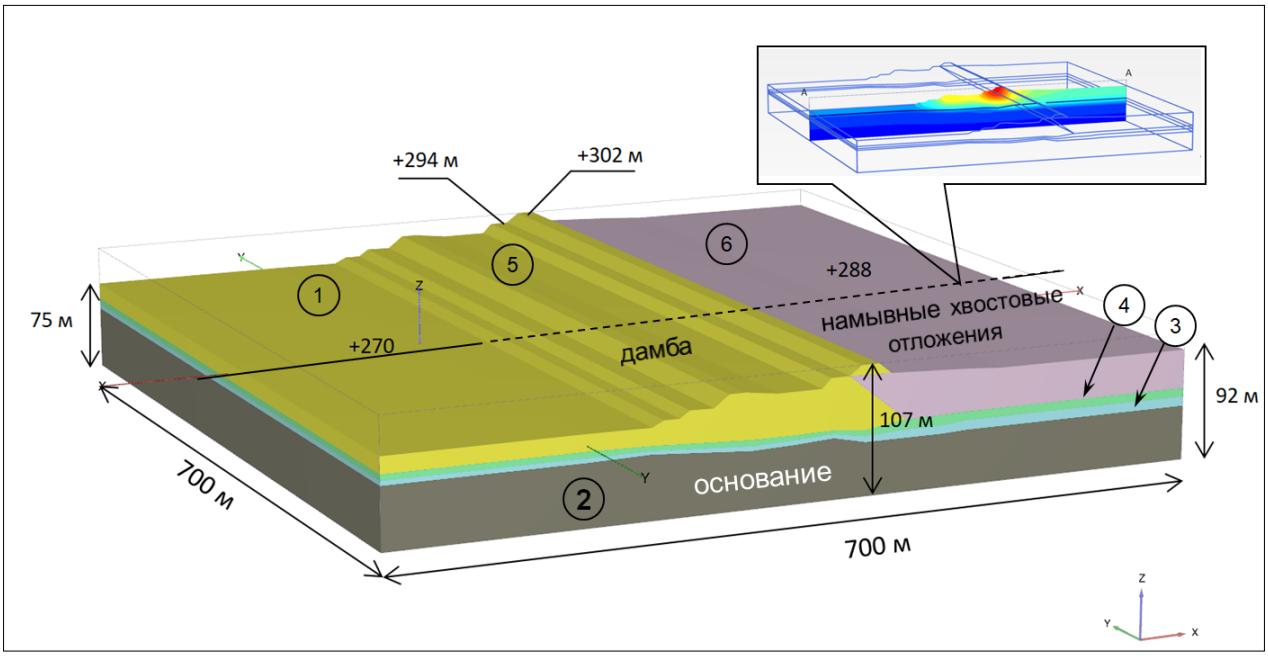


Рис. 1. 3D-модель фрагмента хвостохранилища

Fig. 1. 3D model of tailings storage fragment

На рис. 2 показаны наиболее контрастные картины консолидации грунтов в модели, иллюстрирующие тенденции изменения гидрогеомеханического состояния хвостохранилища с течением времени. Уплотнение грунтов в течение 1-го дня захватывает практически всю насыпную часть ограждающей дамбы с постепенным затуханием к 10-му и далее к 50-му дню. Однако общие приращения перемещений грунтов все-таки в большей степени приурочены к намывным хвостовым отложениям, которые являются сильно водонасыщенными. Консолидация грунтов здесь в течение 10 дней имеет интенсивный характер, а затем стабилизируется (рис 3–5).

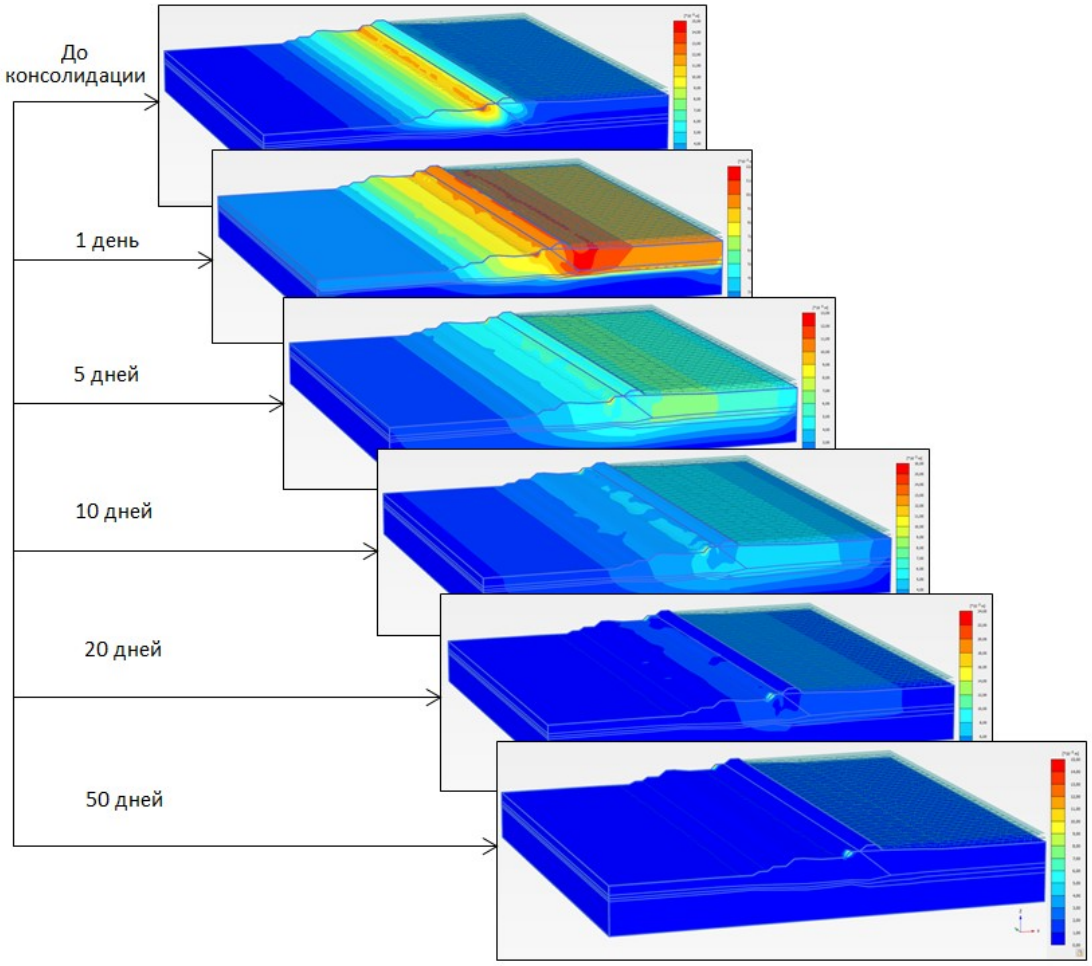


Рис. 2. Тенденции изменения общих приращений перемещений грунтов с течением времени вследствие их консолидации

Fig. 2. Trends in the overall increments of soil movements over time due to their consolidation

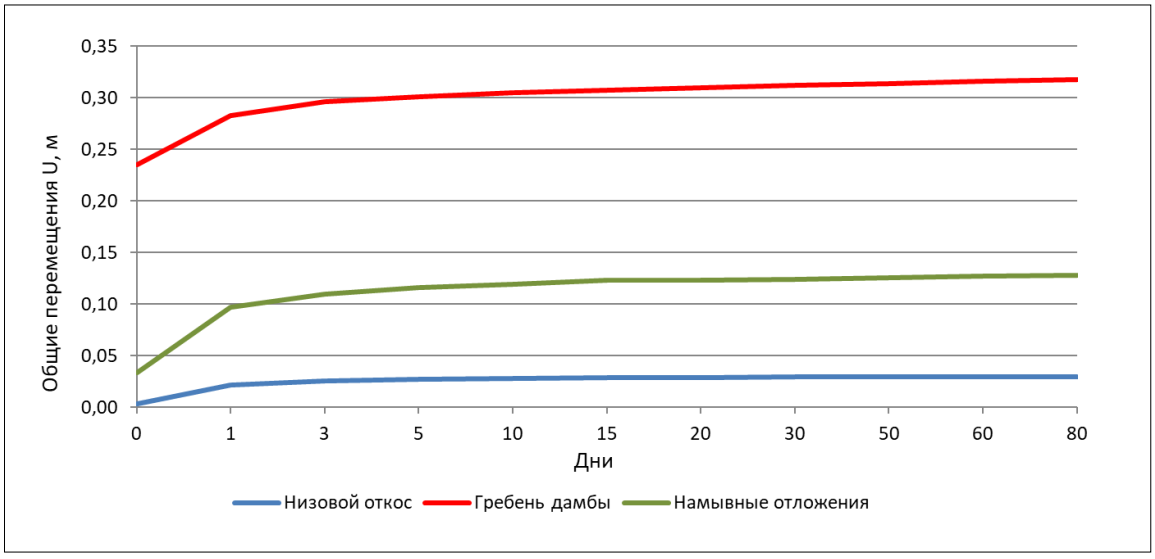


Рис. 3. График зависимости общих перемещений грунтов от времени консолидации на различных участках дамбы

Fig. 3. Dependence of total soil movements on consolidation time at different dam sections

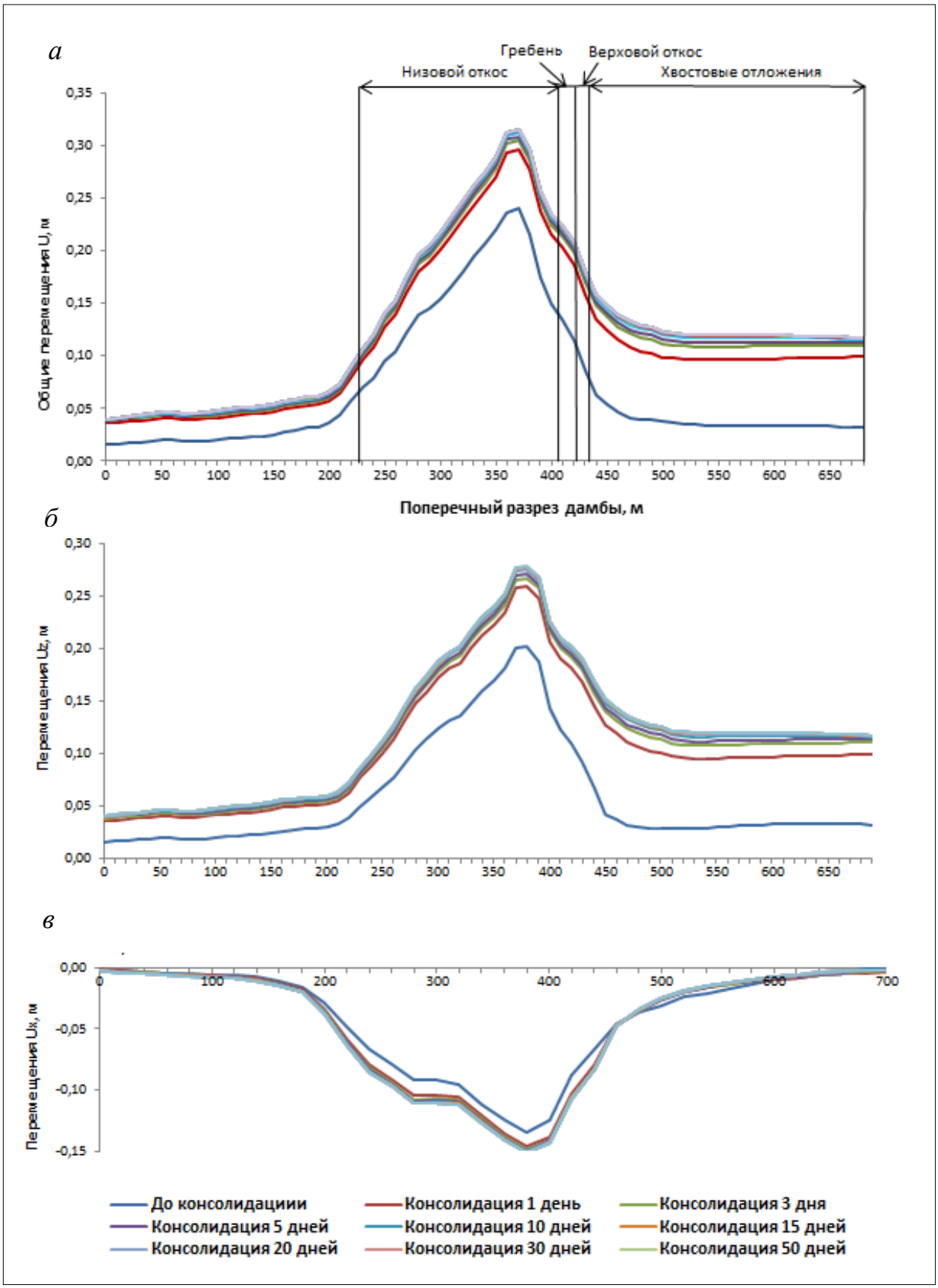


Рис. 4. График зависимости уплотнения грунтов по центральному сечению хвостохранилища от времени консолидации: *а* — общих (полных) $U_{общ}$; *б* — вертикальных U_z; *в* — горизонтальных U_x

Fig. 4. Dependence of soil compaction on tailing tank central section on consolidation time: *а* — total (complete) U_{total}; *б* — vertical U_z; *в* — horizontal U_x

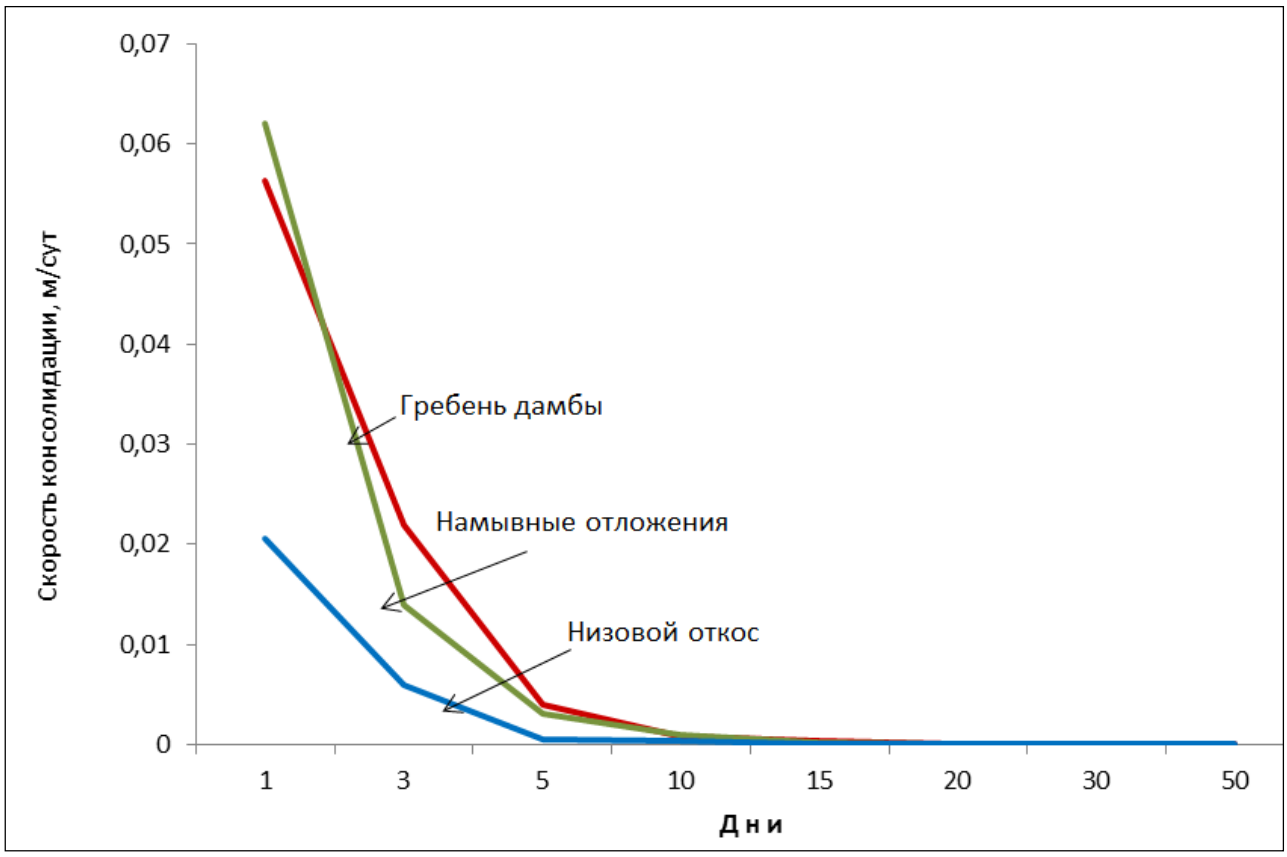


Рис. 5. График зависимости скорости консолидации грунтов от времени

Fig. 5. Soil consolidation rate versus time

Заключение

На основе компьютерного 4D-моделирования (с учетом фактора времени) установлена зависимость фильтрационно-деформационных процессов в гидротехнической системе хвостохранилища от времени консолидации грунтов, что предоставляет детерминированную основу для оценки механической устойчивости ограждающих дамб и надежности ГТС хвостохранилища как открытой сложной водонасыщенной природно-технической системы. Выявлено, что основное упрочнение грунтов происходит в первые 1–5 дней, в течение которых скорость уплотнения структурных частиц снижается от 3–6 до 1 см/сут, с последующим затуханием и соответствующим снижением фильтрационных процессов. Установлено, что полное затухание фильтрационно-деформационных процессов происходит до 80 дней, что предопределяет основу для практических рекомендаций по срокам следующего этапа наращивания дамб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-технический прогресс на горнорудных предприятиях Заполярья / *Н. Н. Мельников [и др.].* Л.: Наука, 1988. 239 с. **2.** *Калашник А. И., Калашник Н. А.* Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 1 (12). С. 27–30. **3.** *Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В.* Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые зап. Петрозаводского гос. ун-та. 2014. № 6 (143). С. 92–98. **4.** *Шестаков В. М.* Гидрогеомеханика. М.: Изд-во МГУ, 1998. 72 с. **5.** Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / *Н. Н. Мельников [и др.]* // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1–1. С. 13–20. **6.** *Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А.* Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 2 (13). С. 13–16. **7.** *Голуб С., Войтюк К.* Опыт применения 4D-моделирования для реализации технического перевооружения // Конференция GOING DIGITAL (Москва, 19 сентября 2019 г.). URL: https://www.bentley.com/ru/global-events/going-digital-events/2019/moscow (дата обращения: 25.11.2019). **8.** *Калашник Н. А.* 4D компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных

процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища // Горн. информ.-аналит. бюлл.: [науч.-техн. журн.]. 2019. С. 393–400. **9.** Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики / *Н. Н. Мельников [и др.]* // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 39–49. **10.** Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / *А. А. Данилкин [и др.]* // Горн. информ.-аналит. бюлл.: [науч.-техн. журн.]. 2014. № 7. С. 344–351.

Сведения об авторе

Калашник Надежда Анатольевна — научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН
E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Author Affiliation

Nadezhda A. Kalashnik — Researcher of the Mining Institute of FRC KSC RAS
E-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

Библиографическое описание статьи

Калашник, Н. А. 4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» / *Н. А. Калашник* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 10–15.

Author Affiliation

Kalashnik Nadezhda A. 4D Simulation of Soil Consolidation of Tailings Storage Facilities of JSC “Kovdorsky GOK”. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 10–15. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.16-28
УДК 556.56

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

И. Л. Калюжный, С. А. Лавров
ФГБУ Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация

На основании выполнения комплекса полевых и лабораторных работ проведены исследования и определены основные теплофизические характеристики деятельного слоя основных типов болот Кольского п-ова. Показано, что основным фактором, определяющим изменение теплофизических характеристик (объемной теплоемкости, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности), является степень увлажнения и, в меньшей мере, плотность сухого вещества торфа. Коэффициенты теплопроводности в талом и мерзлом состоянии деятельного слоя возрастают при увеличении объемной влажности. Установлены обобщенные зависимости изменения теплофизических характеристик от объемной влажности для всех типов болот Кольского п-ова.

Ключевые слова:

болота Кольского п-ова, удельная и объемная теплоемкость, коэффициенты тепло- и температуропроводности.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE ACTIVE LAYER OF THE KOLA PENINSULA BOGS

Igor L. Kalyuzhny, Sergey A. Lavrov
State Hydrological Institute, Saint Petersburg

Abstract

Studies have been conducted and the main thermophysical characteristics of the active layer of the main types of wetlands of the Kola Peninsula were determined on the basis of the implementation of a complex of field and laboratory works. It is shown that the main factor determining the change in thermal characteristics (volumetric heat capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity) is the degree of moisture and, to a lesser extent, the density of peat dry matter. The volumetric heat capacity of the thawed active layer increases from 126–180 to 3704–3723 kJ/(m^3·K) with changes in humidity from 0,0 to 85,4–84,6 %. The coefficients of thermal conductivity, in the thawed and frozen state of the active layer, increase with increasing volume humidity.It has been established that the dependences of the thermal conductivity on the peat moisture (*W*), in the thawed and frozen state, are approximated by equations of the form $\lambda = n\, e^{aW}$. For different types of bogs, the parameters of equations *n* and *a* are close to each other, which made it possible to create uniform dependencies for thawed and frozen peats of the main types of bogs on the Kola Peninsula. It has been established that the dependence of thermal diffusivity coefficient on humidity on all types of wetlands in the thawed state has two maxima. Its highest values are observed in the dry state of peat. In the frozen state of peat, the coefficient of thermal diffusivity increases from zero values to full capacity at which its highest values are observed.

Keywords:

bogs of the Kola Peninsula, specific and volumetric heat capacity, coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity.

Введение

Своеобразие почвенно-климатических условий Кольского п-ова, значительные трудности в осушении, освоении и эффективном использовании болот связаны со слабой изученностью их физических свойств, в том числе и теплофизических характеристик деятельного слоя. Строительство линейных сооружений и мелиоративных систем на болотах требует проведения специальных теплофизических расчетов, которые позволяют оценить

их взаимодействие с окружающей природной средой. Для решения подобных задач необходимым и достаточным является знание комплекса теплофизических характеристик болот этого региона.

В современной гидрофизике болот теплофизические характеристики — это слабо изученная область научного знания. Первые исследования в этом направлении были выполнены В. В. Романовым и О. Д. Рожанской [1, 2], С. С. Корчуновым [3], в дальнейшем — К. К. Павловой [4], Р. И. Гаврильевым и С. В. Елисеевым [5], А. В. Павловым [6], Л. Т. Романом [7] и др. В основном исследования проводились в зоне олиготрофных болот, в северной зоне европейской территории России, в том числе и на болотах Кольского п-ова, определение этих характеристик не проводилось.

Цель настоящей работы — измерение основных теплофизических параметров болот Кольского п-ова в их естественном и осушенном состоянии.

Краткое описание объектов исследования

Полевые работы по обследованию болотных массивов и отбору монолитов торфа для лабораторных исследований проводились в следующих пунктах:

- на естественном олиготрофном болоте (провинция Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа), в районе участка «Колвица», г. Кандалакша;
- на болотном массиве Фенноскандийской провинции березовой лесотундры и крупнобугристых болот, расположенном в 50 км от г. Мурманска, на левом берегу р. Тулома;
- на мезотрофном болотном массиве Карело-Финской провинции северной тайги и аапа-болот, расположенном вблизи пос. Лоухи (Республика Карелия);
- на евтрофном болотном массиве (сфагново-осоково-березовый микроландшафт), Корзинского стационара.

Краткое описание болотных массивов приведено в работе [8].

Методы определения теплофизических характеристик

Основными факторами, оказывающими влияние на передачу тепла в деятельном слое, являются: содержание влаги, плотность торфа, пористость, размер и форма пор. Последние влияют на конвективную и лучистую составляющую теплообмена. Ранее Н. С. Ивановым [9] было установлено, что конвекция возникает в порах диаметром больше 10 мм при температурном перепаде свыше 0,3 °С, что в торфе практически не наблюдается [8]. Лучистая составляющая в грунтах, согласно [9 и др.], не превышает 0,1 % теплопереноса, при радиусе пор 3 мм конвективная составляющая не превосходит 0,13 % общего теплового потока. Согласно [10], размеры пор в торфе не могут превышать 3–5 мм. Отсюда следует, что, несмотря на значительную пористость торфа, лучистой теплопроводностью и конвективным теплопереносом можно пренебречь. В основном перенос тепла в деятельном слое болот осуществляется путем молекулярной (кондуктивной) теплопроводности. Таким образом, знание основных теплофизических характеристик, вытекающих из теории молекулярной теплопроводности, является необходимым условием для решения задач тепломассопереноса в деятельном слое болот.

Исследование теплофизических характеристик деятельного слоя болот проводилось Гидрофизической лабораторией Государственного гидрологического института путем полевых и лабораторных работ, при этом определяли комплекс основных теплофизических характеристик, который дает исчерпывающее представление о тепловых свойствах деятельного слоя.

Важнейшие теплофизические характеристики комплекса — объемная теплоемкость c_ρ, коэффициент теплопроводности λ, а также коэффициент температуропроводности K.

Коэффициент теплопроводности λ определяет способность торфяной залежи проводить тепло, он равен величине тепла, переносимого в единицу времени, при градиенте температуры, равном единице.

Объемная теплоемкость характеризует способность торфяной залежи к нагреву или охлаждению.

Коэффициент температуропроводности численно равен коэффициенту теплопроводности торфяной залежи с объемной теплоемкостью, равной единице.

Между собою они связаны уравнением:

$$K = \lambda / c_\rho, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость сухого вещества торфа; ρ — его плотность.

Это позволяет, если известны две из тепловых характеристик, вычислить третью неизвестную величину.

В лабораторных условиях для определения теплопроводности обычно применяют метод регулярного режима Г. М. Кондратьева [11]. Этим методом непосредственно определяют коэффициент K, а коэффициент λ рассчитывают по уравнению (1). Погрешность определения теплофизических характеристик этим методом не ниже 2–4 % в талом состоянии влаги и 5–8 % — в мерзлом [4].

При определении показателей в лабораторных условиях промороженный монолит торфа извлекают из транспортного контейнера и разрезают на слои заданной толщины. Образец для вычисления коэффициента температуропроводности K вырезают из этих мерзлых слоев и помещают в тонкостенную медную бюксу диаметром 40 мм и высотой 70 мм. Образец размораживают и выдерживают в термостате при заданной температуре в течение 4–6 сут. В центр образца устанавливают термопару, далее проводят опыты с талым образцом по методике [11, 12], изменяя степень его увлажнения.

Коэффициент температуропроводности мерзлого торфа определяется аналогично опытам при положительных температурах, однако при этом в термостатах используют жидкости, не замерзающие при отрицательных температурах.

Опыты по определению удельной теплоемкости сухого вещества торфа производят калориметрическим методом смешения с использованием лабораторного калориметра и образцов торфа, помещенных в тонкостенные медные бюксы, по методике, изложенной в работе [13].

Обсуждение результатов определений теплофизических характеристик

Теплоемкость деятельного слоя. Теплоемкость характеризует способность торфяной залежи к нагреву или охлаждению и равна (численно) количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы объема (или массы почвы) на один градус. Различают удельную и объемную теплоемкость.

Удельная теплоемкость — это теплоемкость твердой фазы абсолютно сухого вещества торфа. В табл. 1 приведены результаты ее определения в микроландшафтах неосушенных мезоолиготрофных болот: сфагново-осоково-березового и сфагново-осокового, кочковатого. На нижней границе деятельного слоя (слой 30–40 см) показатели удельной теплоемкости практически идентичные — 1,0563 и 1,0626 кДж/(кг·К). В пределах всего деятельного слоя (0–40 см) ее средние значения близки — 1,0020 и 1,0099 кДж/(кг·К). На более низких горизонтах торфяной залежи (40–80 см) средние значения отличаются на 25,5 %, что обусловлено степенью разложения торфа и, как следствие, плотностью его сухого вещества.

Между удельной теплоемкостью (c) и плотностью сухого вещества торфа (ρ) на мезоолиготрофных болотах существует зависимость, выраженная уравнением вида:

$$c = -0{,}0014\rho + 1{,}167, \quad (2)$$

коэффициент корреляции которой равен 0,773.

Результаты определения удельной теплоемкости олиготрофных болотных массивов показали, что на нижних границах деятельного слоя сфагново-кустарничкового и сфагново-соснового микроландшафта этих болот удельная теплоемкость равна 1,0393 и 1,0086 кДж/(кг·К) соответственно (табл. 2). Ее средние значения для деятельного слоя (0–40 см) равны 1,0928 и 0,9892 кДж/(кг·К) соответственно

Результаты сравнения удельной теплоемкости деятельного слоя мезоолиготрофных и олиготрофных болот свидетельствуют о практически полном их совпадении. В среднем различия не превышают 1 %. Учитывая вышеизложенное, величину удельной теплоемкости сухого вещества деятельного слоя для мезоолиготрофных и олиготрофных болот можем принять, равной 1,0235 кДж/(кг·К).

Таблица 1
Table 1

Зависимость удельной теплоемкости от объемной плотности деятельного слоя неосушенных мезоолиготрофных болотных массивов

Dependence of the specific heat capacity of the active layer of the dry meso-oligotrophic bog massifs

Параметры Parameters	Глубина слоя, см / Depth of layer, cm							
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80
Сфагново-осоково-березовый микроландшафт / Sphagnum-sedge-birch microlandscape								
Объемная плотность сухого торфа, кг/м^3 Volume density of dry peat, kg/m^3	75	70	59	97	180	269	243	267
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) Specific heat capacity, kJ/(kg·K)	0,9642	1,0287	0,9588	*1,0563*	0,8449	0,7729	0,7879	0,7423
Сфагново-осоковый, кочковатый микроландшафт / Sphagnum-sedge, bumpy microlandscape								
Объемная плотность сухого торфа, кг/м^3 Volume density of dry peat, kg/m^3	130	147	145	138	121	125	153	158
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) Specific heat capacity, kJ/(kg·K)	0,9625	0,9969	1,0178	1,0626	1,0689	1,1003	1,0530	1,0011

Таблица 2
Table 2

Зависимость удельной теплоемкости от объемной плотности деятельного слоя неосушенных олиготрофных болотных массивов

Dependence of the specific pecific heat capacity of the active layer of undrained oligotrophic bog massifs

Параметры Parameters	Глубина слоя, см / Depth of layer, cm								
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	100–110
Сфагново-кустарничковый микроландшафт / Sphagnum-shrub microlandscape									
Объемная плотность сухого торфа, кг/м^3 Volume density of dry peat, kg/m^3	106	86	103	113	115	93	87	89	–
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) Specific heat capacity, kJ/(kg·K)	1,1443	1,0739	1,1137	1,0393	1,0065	1,0727	1,0153	1,0027	–
Сфагново-сосновый микроландшафт / Sphagnum-pine microlandscape									
Объемная плотность сухого торфа, кг/м^3 Volume density of dry peat, kg/m^3	89	144	189	183	181	167	194	187	551
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) Specific heat capacity, kJ/(kg·K)	0,9701	0,9692	1,0090	1,0086	1,1489	1,0965	1,0132	1,0157	0,8307

Удельная теплоемкость верхового торфа, согласно определению Л. Т. Романа [7], равна 1,68 кДж/(кг·К), низинного — 1,92 кДж/(кг·К). В расчетах удельную теплоемкость воды принимают равной 4,20 кДж/(кг·К), льда — 2,10 кДж/(кг·К).

Объемная теплоемкость деятельного слоя в талом и мерзлом состоянии. Объемная теплоемкость равна количеству тепла, которое необходимо для изменения температуры 1 м^3 торфа на 1 °С.

В работах [12, 14] показано, что теплоемкость всех грунтов — величина аддитивная, т. е. равна сумме теплоемкостей составляющих компонентов. Ее предложено выражать через удельные теплоемкости компонентов среды, теплота фазовых превращений при этом не учитывается. Из этого следует, что объемная теплоемкость деятельного слоя и торфяной залежи при положительной температуре рассчитывается как сумма объемных теплоемкостей сухого вещества торфа и воды. В качестве примера в табл. 3 приведена зависимость объемной теплоемкости от влажности верхнего и нижнего горизонта деятельного слоя осушенного мезоолиготрофного болота с 26-летним периодом освоения. Анализ табл. 3 показывает, что объемная теплоемкость возрастает от 126–180 до 3704–3723 кДж/(м^3·К) при изменении влажности слоев от 0,0 до 85,4–84,6 %.

Таблица 3
Table 3

Зависимость объемной теплоемкости от влажности торфа на верхней и нижней границах деятельного слоя осушенного мезоолиготрофного болота в районе г. Мурманска

Dependence of the volume heat capacity on the peat moisture in the upper and lower boundaries of the active layer of a dried mesooligotrophic bog near the city of Murmansk

Влажность слоя, % объема Layer moisture, % of volume	Объемная теплоемкость, c_ρ кДж/(м^3·К) Volumetric heat capacity c_ρ, kJ/(m^3·K)	Влажность слоя, % объема Layer moisture, % of volume	Объемная теплоемкость, c_ρ кДж/(м^3·К) Volumetric heat capacity c_ρ, kJ/(m^3·K)
Слой 0–10 см. Плотность сухого вещества 197 кг/м^3 Layer 0–10, cm. Density of dry matter is 197 kg/m^3			
84,6	3723	33,3	1575
73,0	3239	23,5	997
65,6	2929	13,1	729
54,0	2443	0,0	180
43,5	2003		
Слой 50–60 см. Плотность сухого вещества 114 кг/м^3 Layer 50–60, cm. Density of dry matter is 114 kg/m^3			
84,6	3723	33,3	1575
73,0	3239	23,5	997
65,6	2929	13,1	729
54,0	2443	0,0	180
43,5	2003		

Объемная теплоемкость мерзлого слоя при стабилизации фазовых превращений представляет собой сумму удельных теплоемкостей сухого вещества торфа, льда и незамерзшей воды. На рис. 1 приведен график зависимости изменения объемной теплоемкости от температуры и влажности (W) деятельного слоя. В диапазоне температур от 0 до –5 °С теплоемкость значительно снижается, и далее ее уменьшение относительно стабилизируется по мере понижения температуры до –10…–15 °С. Согласно рис. 1, теплоемкость также уменьшается при понижении влажности торфа.

При высокой влажности торфа (55–80 %) значительная часть воды находится в свободном состоянии. Замерзает эта вода при температуре 0 °С, теплоемкость при этом изменяется скачком. При показателях влажности порядка 15–20 % вся вода находится в связанном состоянии, а тепловые характеристики в области фазовых превращений изменяются очень плавно.

Но на величину теплоемкости при промерзании или оттаивании почвы воздействует тепловой эффект фазового превращения воды. Тогда, согласно работе Н. С. Иванова [9], объемную эффективную теплоемкость промерзающей залежи можно рассчитать по формуле

$$(c_\rho)_{эф} = c_\rho + c_в\rho_в + c_л\rho_л + L\rho_в W_{нз}/dT, \quad (3)$$

где ρ, $\rho_в$, $\rho_л$ — плотность сухого вещества торфа, воды и льда соответственно; c, $c_в$, $c_л$ — удельная теплоемкость сухого вещества торфа, воды и льда соответственно; L — удельная теплота плавления льда, равная 336 кДж/кг, $L\rho_в W_{нз}/dT$ — изменение объемного содержания незамерзшей воды при изменении температуры на 1 °С.

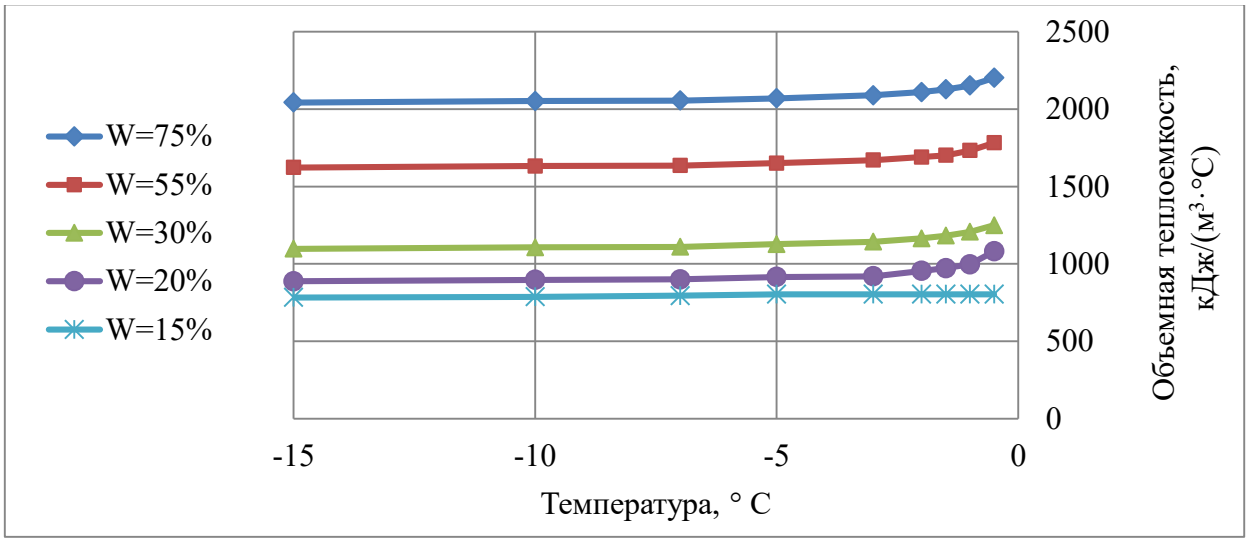


Рис. 1. Зависимость объемной теплоемкости деятельного слоя осушенного мезоолиготрофного болота от температуры и влажности (W, % объема)

Fig. 1. The dependence of the volumetric heat capacity of the active layer of the dried mesooligotrophic bog on temperature and humidity (W, % of volume)

Теплопроводность деятельного слоя болот. На основании более 530 лабораторных опытов с образцами деятельного слоя залежи (в их талом и мерзлом состоянии) были получены значения теплофизических характеристик от определяющих факторов для основных типов болот Кольского полуострова.

Установлено, что основным фактором, определяющим изменение коэффициента теплопроводности, является содержание влаги в форме воды или льда. Математическая обработка полученных результатов позволила выразить зависимость величины коэффициента теплопроводности от степени увлажнения слоев торфа в их талом и мерзлом состоянии в виде:

$$\lambda = n\, e^{aW}, \quad (4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); n и a — безразмерные параметры, определяемые экспериментально; e — основание натуральных логарифмов; W — влажность торфа, % от объема.

На рис. 2 приведена зависимость $\lambda_т = f(W)$ для сфагново-осокового микроладшафта мезоолиготрофного болота (пос. Лоухи) при положительных температурах, аппроксимируемая уравнением

$$\lambda_т = 0{,}036\, e^{0{,}029W}, \quad (5)$$

коэффициент корреляции которой равен 0,97.

С увеличением влажности, согласно графику, возрастает и теплопроводность торфа.

Постепенное увеличение влажности от нулевых значений до 55 % определяет и плавное увеличение теплопроводности. При влажности более 55–60 % происходит резкое ее увеличение. При небольшой влажности с увеличением толщины водной пленки коэффициент теплопроводности повышается незначительно до тех пор, пока отдельные пленки не сольются в сплошную, затем он растет высокими темпами по мере увеличения их толщины и ликвидации свободной от воды пористости. При влажности около 90 % коэффициент $\lambda_т$ приближается к величине молекулярной теплопроводности воды.

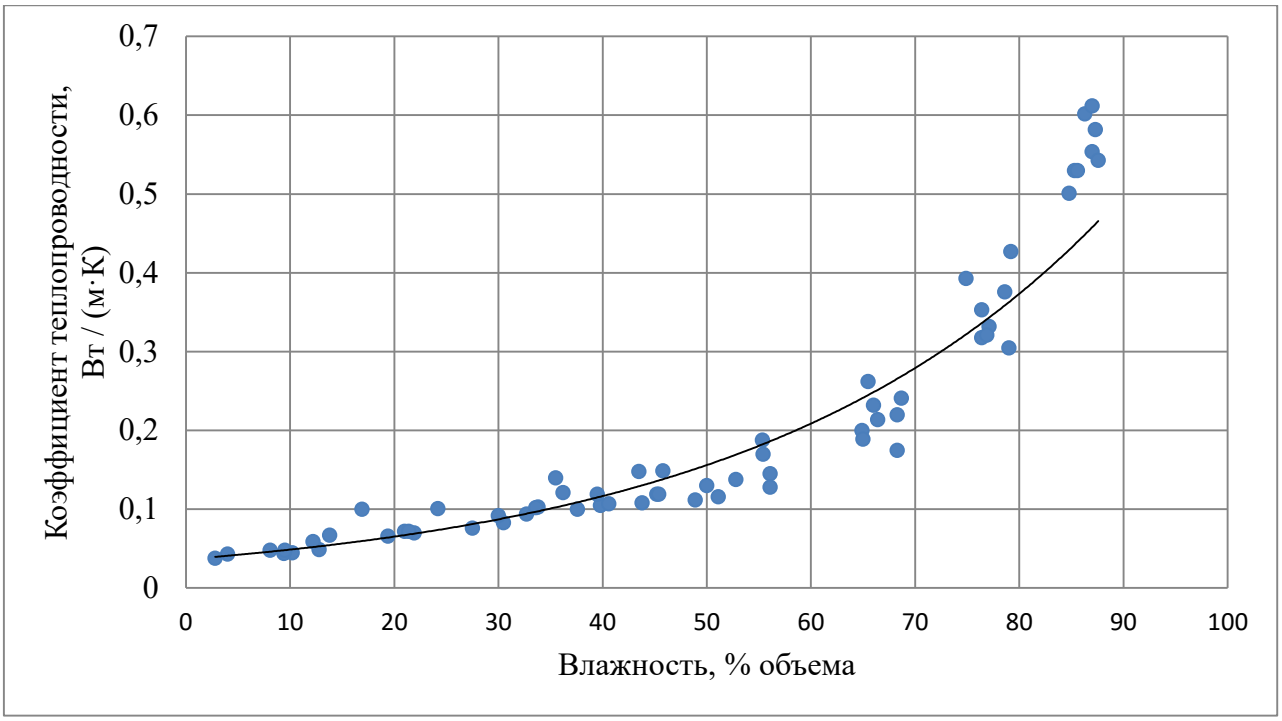


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности ($\lambda_т$, Вт/(м·К)) от влажности талого торфа деятельного слоя сфагново-осокового микроландшафта

Fig. 2. Dependence of the coefficient of thermal conductivity (λ_{th}, W/(m·K)) on the moisture of the thawed peat of the active layer of the sphagnum-sedge microlandscape

Было установлено, что изменение степени разложения торфа, в диапазоне от 2 до 20 %, а также его видовой состав, не влияют на характер полученной зависимости. Объясняется это тем, что увеличение теплопроводности происходит в основном за счет образования пленочной влаги на контактах частиц торфа и неразложившихся остатков растений. Ввиду незначительного количества органического вещества теплопроводность обусловлена в основном только толщиной водных пленок.

В табл. 4 приведены результаты определения и обобщения коэффициентов теплопроводности деятельного слоя основных типов болот Кольского п-ова в талом и мерзлом состоянии.

Анализ полученной зависимости $\lambda_т = f(W)$ для образцов, отобранных на основных типах болот Кольского п-ова, показывает, что они близки между собой. Безразмерные параметры n и a изменяются в узких пределах: n — от **0,036** до 0,055; a — от 0,024 до 0,029. Это позволяет создать единую зависимость $\lambda_т = f(W)$ для всех типов болот полуострова в виде:

$$\lambda_т = 0{,}044\ e^{0{,}027W} \qquad (6)$$

при коэффициенте корреляции 0,957 и длиной ряда 300 членов.

Полученная зависимость вполне удовлетворяет требования расчетов теплового режима болот (рис. 3).

При небольшой общей влажности торфа — до 15–20 % (в зависимости от температуры образца) коэффициенты теплопроводности слабо зависят от фазового состояния воды. При общей влажности до 25–30 % соотношение $\lambda_м/\lambda_т$ изменяется незначительно — от 0,85 до 1,00, однако при более высокой влажности (больше 30 %) теплопроводность мерзлого торфа деятельного слоя становится значительно выше теплопроводности талого, что обусловлено большей теплопроводностью льда по сравнению с водой. Теплопроводность воды равна 0,503 Вт/(м·К), тогда как теплопроводость льда — 2,450 Вт/(м·К). Таким образом, изменение фазового состава воды, в свою очередь, вызывает изменение тепловых свойств деятельного слоя.

Таблица 4
Table 4

Коэффициенты теплопроводности деятельного слоя болот
в их талом ($\lambda_т$) и мерзлом ($\lambda_м$) состоянии

The thermal conductivity coefficients of the wetlands active layer
in their thaw (λ_{th}) and frozen (λ_f) state

Интервалы Intervals		Зависимость $\lambda_т = f(W)$ Dependence $\lambda_{th} = f(W)$		Интервалы Intervals		Зависимость $\lambda_м = f(W)$ Dependence $\lambda_f = f(W)$	
ρ, г/см^3 ρ, g/cm^3	*W*, % об. *W*, vol%	Уравнения Equations	*R*	ρ, г/см^3 ρ, g/cm^3	*W*, % об. *W*, vol%	Уравнения Equations	*R*
Мезоолиготрофное болото / Mesooligotrophic swamp							
Сфагново-осоковый микроландшафт, разрез 20, пос. Лоухи Sphagnum-sedge microlandscape, incision 20, Louhi Village							
0,121–0,125	0–80	$\lambda_т = 0{,}038\ e^{0{,}029W}$	0,98	0,121–0,147	0–80	$\lambda_м = 0{,}023\ e^{0{,}048W}$	0,98
0,125–0,158	3–87	$\lambda_т = 0{,}036\ e^{0{,}029W}$	0,97	–	–	–	–
Евтрофное болото / Eutrophic swamp							
Сфагново-осоково-березовый микроландшафт, разрез 1, Корзинский стационар Sphagnum-sedge-birch microlandscape, incision 1, Korzinsky stationary area							
0,059–0,269	0–86	$\lambda_т = 0{,}043\ e^{0{,}027W}$	0,96	0,059–0,097	0,3–86	$\lambda_м = 0{,}048\ e^{0{,}041W}$	0,98
–	–	–		0,179–0,269	0,9–85	$\lambda_м = 0{,}024\ e^{0{,}042W}$	0,92
Олиготрофное болото / Oligotrophic swamp							
Сфагново-кустарничковый микроландшафт, разрез 8, г. Кандалакша Sphagnum-shrub microlandscape, incision 8, town of Kandalaksha							
0,086–0,114	0–89	$\lambda_т = 0{,}055\ e^{0{,}025W}$	0,98	0,086–0,114	0–89	$\lambda_м = 0{,}046\ e^{0{,}04W}$	0,98
Сфагново-сосновый микроландшафт, разрез 12, р. Тулома Sphagnum-pine microlandscape, incision 12, Tuloma River							
0,089 и <	0–83	$\lambda_т = 0{,}053\ e^{0{,}029W}$	0,96	0,089–0,551	0–90	$\lambda_м = 0{,}105\ e^{0{,}029W}$	0,92
0,144–0,551	0–90	$\lambda_т = 0{,}041\ e^{0{,}027W}$	0,96	–	–	–	–

Примечания: ρ — плотность сухого вещества; *W* — влажность торфа; *R* — коэффициент корреляции.

Notes: ρ — dry substance density; *W* — moisture peat; *R* — correlation coefficient.

Полученные показатели зависимости коэффициента теплопроводности мерзлых торфов показывают, что их теплопроводность зависит в основном от общего влагосодержания. Как и в случае талой залежи, коэффициент теплопроводности мерзлых торфов аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (4). Параметры зависимости (4) основных типов болот в их мерзлом состоянии (см. табл. 4) близки между собой. Обобщающая их зависимость имеет следующий вид при коэффициенте корреляции 0,912 (рис. 4):

$$\lambda_м = 0{,}052\ e^{0{,}0375W}. \quad (7)$$

Обобщенная зависимость для микроландшафтов олиготрофных болот описывается уравнением вида:

$$\lambda_м = 0{,}069\ e^{0{,}035W} \quad (8)$$

при несколько большем коэффициенте корреляции *R*, равном 0,932.

Главным фактором, определяющим изменения коэффициента температуропроводности при положительных температурах, является объемная влажность и, в значительно меньшей мере, объемная масса сухого вещества торфа. На рис. 5 приведена эта зависимость для сфагново–осокового микроландшафта олиготрофного болота.

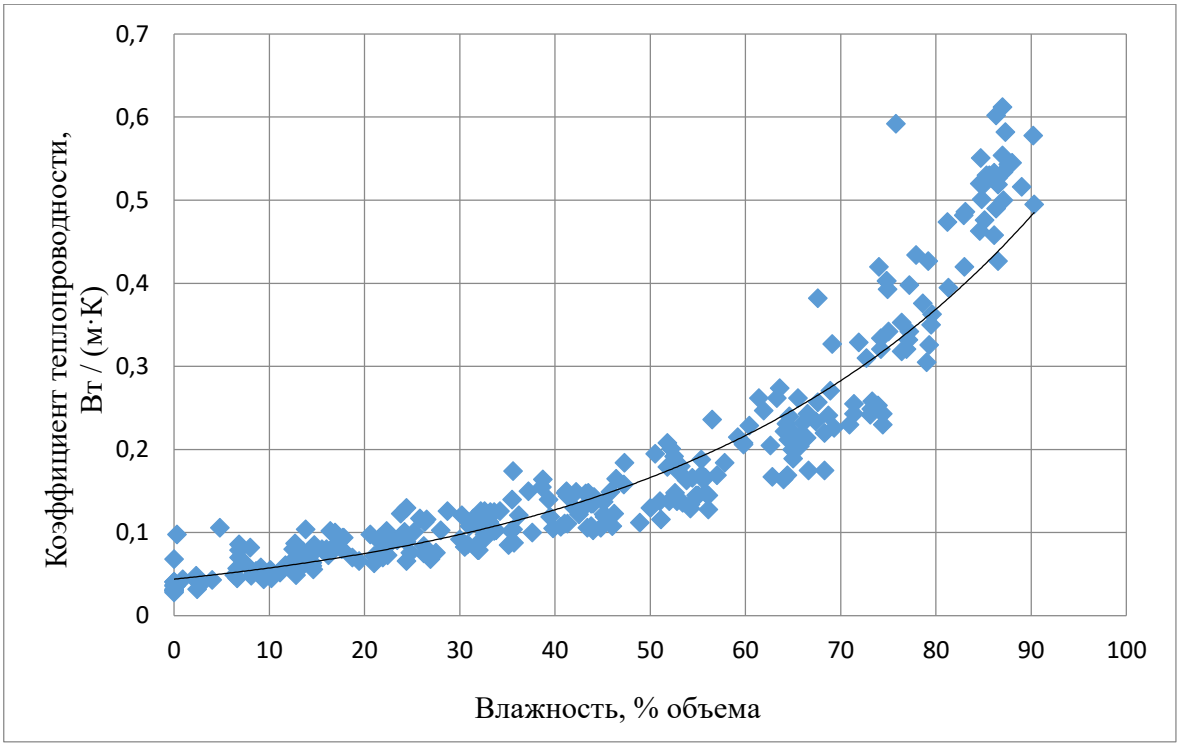


Рис. 3. Единая обобщенная зависимость коэффициента теплопроводности ($\lambda_т$, Вт/(м·К) от влажности (W, % объема) в талом состоянии деятельного слоя всех типов болот Кольского п-ова

Fig. 3. The unified generalized dependence of the thermal conductivity coefficient (λ_{th}, W/(m·K) in the thawed state on humidity (W, % by volume) of the active layer of all types of Kola Peninsula wetlands

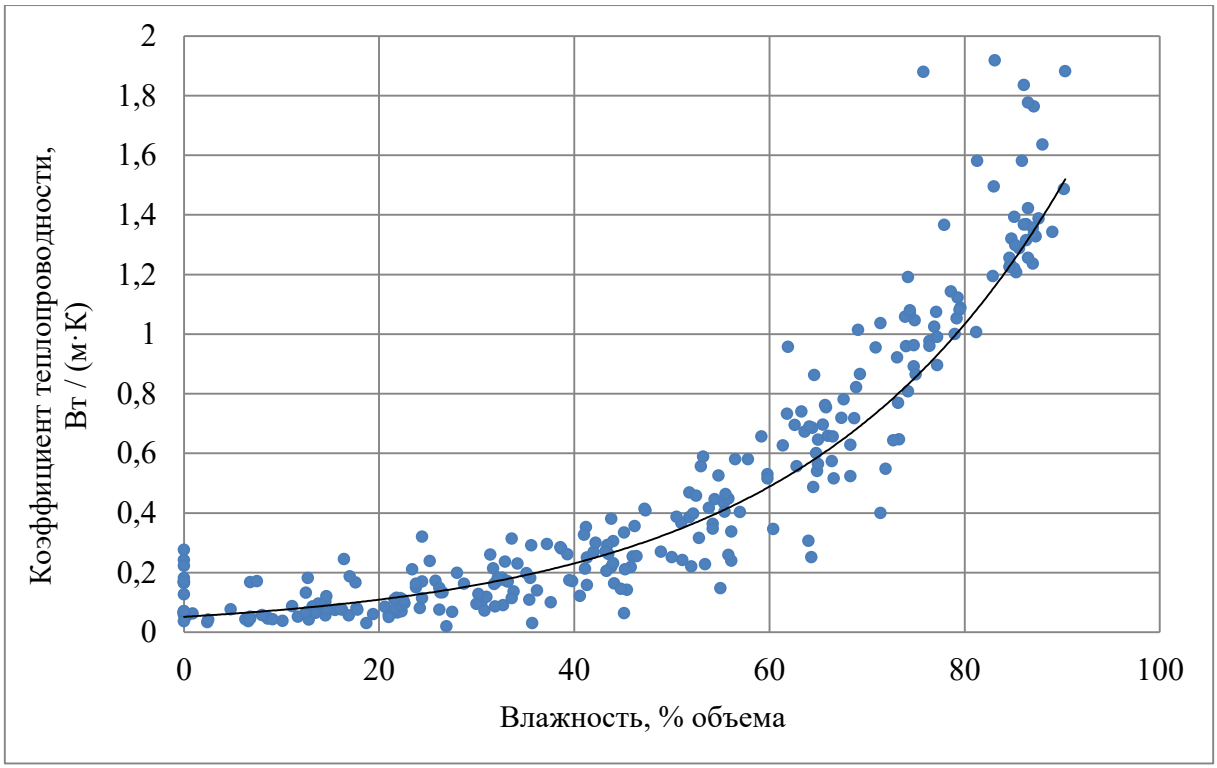


Рис. 4. Единая обобщенная зависимость коэффициента теплопроводности ($\lambda_м$, Вт/(м·К) от влажности (W, % объема) в мерзлом состоянии деятельного слоя всех типов болот Кольского п-ова

Fig. 4. The unified generalized dependence of the thermal conductivity (λ_f, W/(m·K) on humidity (W, % by volume) in the frozen state of the active layer of all types of the Kola Peninsula wetlands

Зависимость $K = f(W)$ имеет два максимума. Первый максимум с наибольшим значением коэффициента температуропроводности наблюдается при абсолютно сухом состоянии торфа, согласно рис. 5, на мезоолиготрофном болоте при влажности 0,0 % K = 0,0076–0,009 м^2/с. Второй максимум наблюдается при влажности около 90 %, он несколько меньше первого. На олиготрофных болотах, в сфагново-сосновом и сфагново-кустарничковом микроландшафтах, первый максимум варьируется от 0,006 до 0,009 м^2/с, второй — от 0,008 до 0,012 м^2/с соответственно.

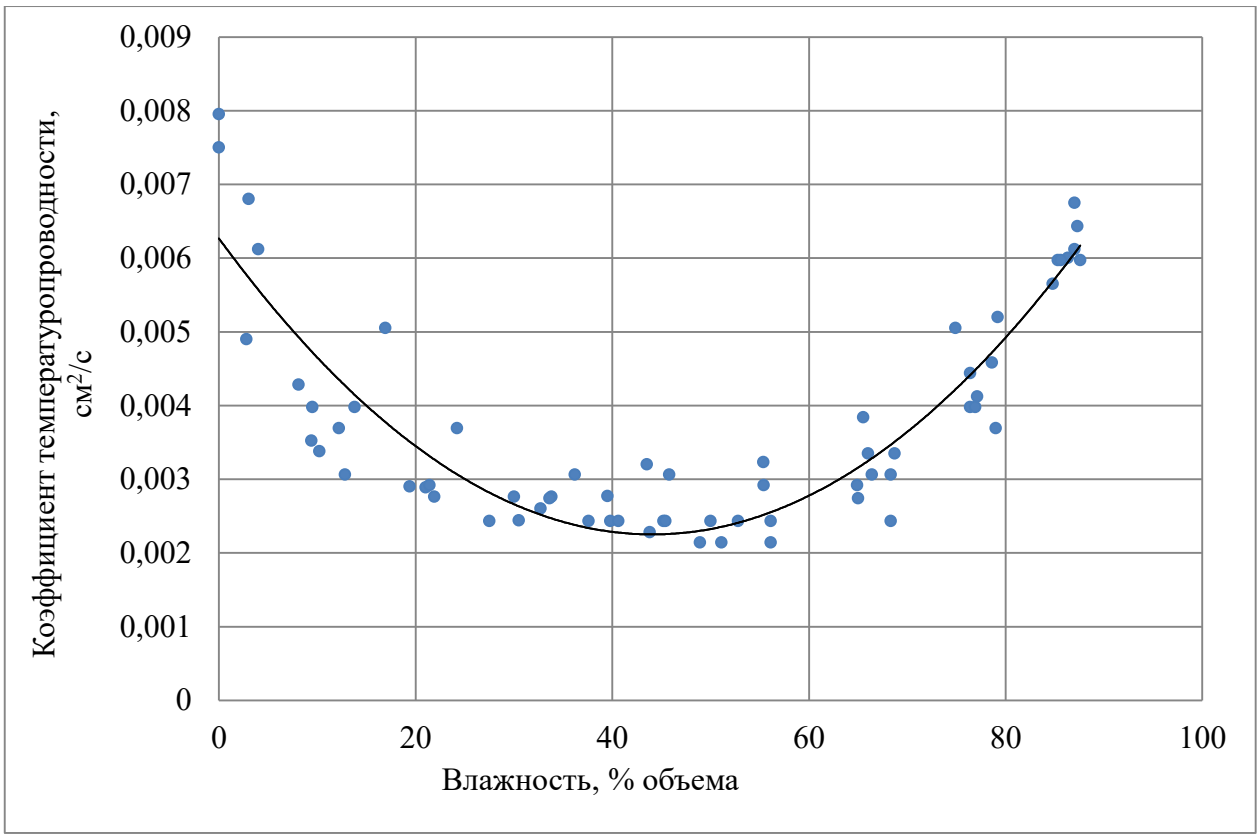


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности (K, см^2/с) от влажности талого торфа деятельного слоя сфагново-осокового микроландшафта

Fig. 5. Dependence of thermal diffusivity (K, cm^2/s) on moisture of the thawed peat of the active layer of sphagnum-sedge microlandscape

Характерной особенностью полученной зависимости является уменьшение коэффициента температуропроводности при возрастании влажности от нулевых значений до 38–40 %, что соответствует внутриклеточной влагоемкости. Данный факт объясняется тем, что на этом отрезке зависимости $K = f(W)$ объемная теплоемкость возрастает быстрее, чем коэффициент температуропроводности. Но далее, с увеличением влажности, данный коэффициент резко повышается и достигает второго максимума.

Учитывая эту особенность полученной зависимости, мы разделили ее на две ветви — нисходящую и восходящую. Полученные результаты обобщенной зависимости $K = f(W)$ для болот Кольского п-ова при положительных температурах приведены в табл. 5. Использование данных показателей позволяет надежно определять теплофизические характеристики на болотных массивах, не исследованных ранее.

Экспериментальным путем установлено, что температуропроводность мерзлого торфа в основном зависит от его общей влажности. Коэффициент температуропроводности увеличивается с ростом общей влажности (рис. 6). Для всех типов болот Кольского п-ова зависимость $K_м = f(W)$ хорошо выражена и имеет высокий коэффициент корреляции от 0,96 до 0,99. Результаты обобщения полученных зависимостей приведены в табл. 6.

Таблица 5
Table 5

Обобщенные зависимости коэффициента температуропроводности ($K \cdot 10^5$, см^2/с) образцов деятельного слоя основных типов болот Кольского п-ова при положительных температурах

Generalized dependences of the thermal diffusivity ($K \cdot 10^5$, cm^2/s) of the samples of active layer of the main types of Kola Peninsula wetlands at positive temperatures

Плотность сух. вещ., г/см^3 Density of dry matter, g/m^3	Диапазон влажности, % объема Humidity range, % of volume	Нисходящая ветвь Descending branch		Восходящая ветвь Rising branch	
		Уравнение $K = f(W)$ Equation $K = f(W)$	R	Уравнение $K = f(W)$ Equation $K = f(W)$	R
Мезоолиготрофное болото / Mesooligotrophic swamp					
Сфагново-осоковый микроладшафт, разрез 20, пос. Лоухи Sphagnum-sedge microlandscape, incision 20, Louhi Village					
0,121–0,158	0–52,8	$K_т = 444{,}14\ e^{-0{,}013W}$	0,78		
0,121–0,158	52,8–87,0			$K_т = 47{,}158\ e^{0{,}029W}$	0,92
0,121–0,158	0–87,0	$K_т = 0{,}1785W^2 - 15{,}045W + 554{,}5$			0,91
Евтрофное болото / Eutrophic swamp					
Сфагново-осоково-березовый микроландшафт, разрез 1, Корзинский стационар Sphagnum-sedge-birch microlandscape, incision 1, Korzinsky stationary area					
0,059–0,180	0–50,0	$K_т = 687{,}14\ e^{-0{,}025W}$	0,78		
0,180–0,269	50,0–86,5			$K_т = 87{,}448\ e^{0{,}021W}$	0,87
0,059–0,269	0–86,5	$K_т = 0{,}2024W^2 - 18{,}623W + 677{,}2$			0,85
Олиготрофное болото / Oligotrophic swamp					
Сфагново-кустарничковый микроландшафт, разрез 8, г. Кандалакша Sphagnum-shrub microlandscape, incision 8, town of Kandalaksha					
0,086–0,115	0–43,3	$K_т = 805\ e^{-0{,}025W}$	0,87		
0,086–0,115	43,3–89,0			$K_т = 149{,}55\ e^{-0{,}025W}$	0,85
0,086–0,115	0–89,0	$K_т = 0{,}264W^2 - 26{,}265W + 924{,}2$			0,89
Сфагново-сосновый микроландшафт, разрез 12, р. Тулома Sphagnum-pine microlandscape, incision 12, Tuloma River					
0,089–0,227	0–50,0	$K_т = 0{,}377W^2 - 26{,}132W + 692{,}2$	0,91		
0,089–0,227	50,0–90,3			$K_т = 78{,}86\ e^{-0{,}0212W}$	0,85
0,089–0,551	0–90,3	$K_т = 0{,}203W^2 - 18{,}636W + 652{,}9$			0,88

Таблица 6
Table 6

Обобщенные зависимости коэффициента температуропроводности ($K \cdot 10^5$, см^2/с) основных типов болот Кольского п-ова при отрицательных температурах

Generalized dependencies of thermal diffusivity coefficient ($K\ 10^5$, cm^2/s) of the main types of the Kola Peninsula wetlands at negative temperatures

Диапазон характеристик / Range of characteristics		Зависимость $K_м = f(W)$ Dependence $K_f = f(W)$	R
Плотность сух. вещ., г/см^3 Density of dry matter, g/cm^3	Влажность, % объема Humidity, % of volume		
Мезоолиготрофное болото / Mesooligotrophic swamp			
Сфагново-осоковый микроландшафт, разрез 20, пос. Лоухи Sphagnum-sedge microlandscape, incision 20, Louhi Village			
0,121–0,158	12,8–86,0	$K_м = 203{,}05\ e^{0{,}0306W}$	0,971

Окончание таблицы 6
Table 6 (Continued)

Диапазон характеристик / Range of characteristics		Зависимость $K_м = f(W)$ Dependence $K_f = f(W)$;	*R*
Плотность сух. вещ., г/см^3 Density of dry matter, g/cm^3	Влажность, % объема Humidity, % of volume		
Евтрофное болото, разрез 1, Корзинский стационар Eutrophic swamp, incision 1, Korzinsky stationary area			
Сфагново-осоково-березовый микроландшафт / Sphagnum-sedge-birch microlandscape			
0,059–0,097	2,0–85,0	$K_м = 592{,}15\ e^{0{,}0181W}$	0,963
0,180–0,268	0,0–86,5	$K_м = 0{,}523W - 127{,}9$	0,990
Олиготрофное болото / Oligotrophic swamp			
Сфагново-кустарничковый микроландшафт, разрез 8, г. Кандалакша Sphagnum-shrub microlandscape, incision 8, town of Kandalaksha			
	8,0–90,0	$K_м = 421{,}21\ e^{0{,}022W}$	0,970
Сфагново-сосновый микроландшафт, разрез 12, р. Тулома Sphagnum-pine microlandscape, incision 12, Tuloma River			
0,089–0,551	0,0–90,0	$K_м = 199{,}48\ e^{0{,}029W}$	0,921

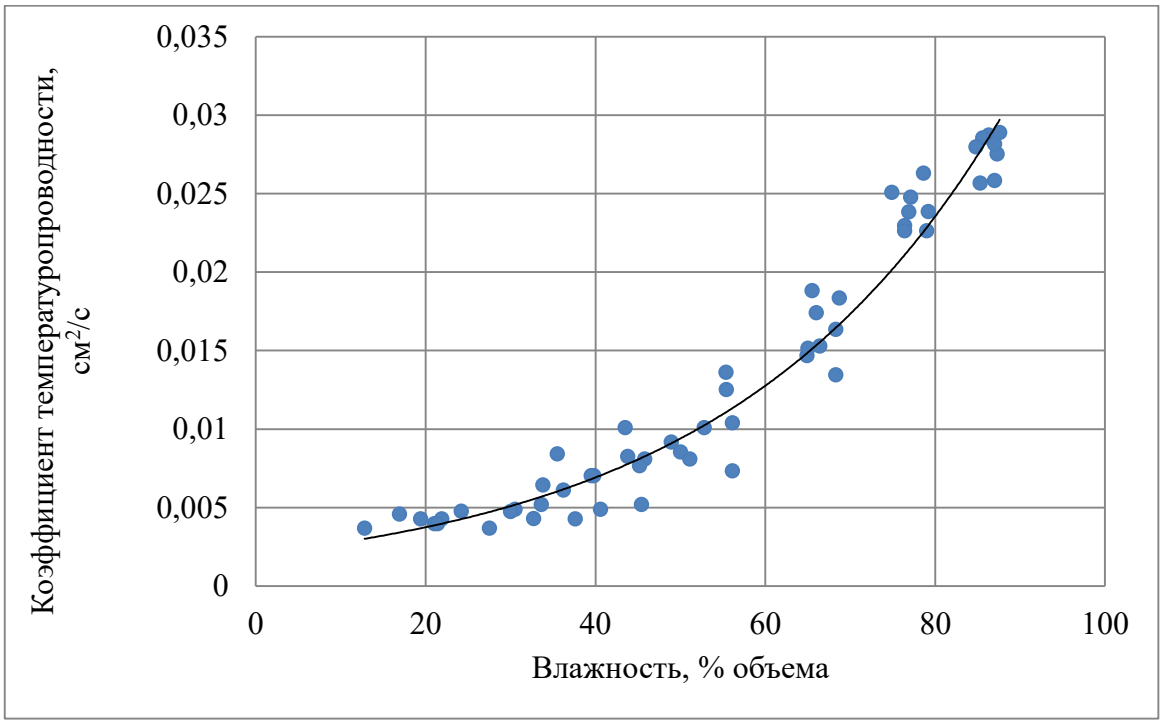


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности (K, см^2/с) от влажности мерзлого деятельного слоя сфагново-осокового микроландшафта

Fig. 6. The dependence of the thermal diffusivity (K, cm^2/s) on moisture of the frozen active layer of sphagnum-sedge microlandscape

Выводы

Проведен комплекс полевых и лабораторных работ, на основании которых выполнены исследования и определены теплофизические характеристики деятельного слоя мезоолиго-, олиго- и евтрофных болот Кольского п-ова. Показано, что основным фактором, определяющим изменение теплофизических характеристик (объемной теплоемкости, коэффициентов температуро- и теплопроводности), является степень увлажнения и, в меньшей мере, плотность сухого вещества торфа. Определена зависимость изменения теплофизических характеристик от объемной влажности для всех типов болот Кольского п-ова.

Установлено, что объемная теплоемкость талого деятельного слоя возрастает от 126–180 до 3704–3723 кДж/(м^3·К) при изменении влажности от 0,0 до 85,4–84,6 %. Показатели зависимости коэффициента теплопроводности от влажности торфа в талом и мерзлом состоянии аппроксимируются уравнениями вида $\lambda = n\, e^{aW}$. Для различных типов болот параметры уравнений n и a близки между собой, что и позволило создать единые зависимости для талых и мерзлых торфов основных типов болот Кольского п-ова.

Показано, что величина коэффициента теплопроводности в талом и мерзлом состоянии деятельного слоя возрастает при увеличении объемной влажности.

Установлено, что зависимость коэффициента температуропроводности от влажности на всех типах болот в талом состоянии имеет два максимума. Первый максимум наблюдается в абсолютно сухом состоянии торфа, на мезоолиготрофном болоте он равен 0,0076–0,009 м^2/с; второй пик наблюдается при влажности около 90 %, он и несколько меньше первого. На олиготрофных болотах распределение максимумов подвергается тем же закономерностям. Такой вид зависимости объясняется тем, что при увеличении влажности от 0 % до уровня внутриклеточной влагоемкости объемная теплоемкость возрастает быстрее, чем коэффициент теплопроводности, но далее с увеличением влажности коэффициент температуропроводности увеличивается и достигает второго максимума.

Показано, что в мерзлом состоянии торфа коэффициент температуропроводности возрастает от нулевых значений до максимума при полной влагоемкости.

ЛИТЕРАТУРА.

1. *Романов В. В., Рожанская О. Д.* Опыт исследования физических свойств промерзшего слоя болот // Труды ГГИ. 1948. Вып. 7 (61). С. 93–105. **2.** *Романов В. В., Рожанская О. Д.* Тепловые свойства сфагнового очеса // Труды ГГИ. 1949. Вып. 13 (67). С. 63–74. **3.** *Корчунов С. С.* Теплопроводность торфа // Торфяная промышленность. 1948. № 2. С. 15–19. **4.** *Павлова К. К.* Тепловые свойства деятельного слоя болот // Труды ГГИ. 1969. Вып. 177. С. 119–155. **5.** *Гаврильев Р. И., Елисеев С. В.* Тепловые свойства торфа. Методы определения тепловых свойств горных пород. М.: Наука, 1970. С. 145–153. **6.** *Павлов А. В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1979. 285 с. **7.** *Роман Л. Т.* Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 222 с. **8.** *Калюжный И. Л.* Содержание незамерзшей влаги в сезонно мерзлом деятельном слое болот Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 55–64. **9.** *Иванов Н. С.* Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1969. 239 с. **10.** *Калюжный И. Л.* Гидрофизические свойства деятельного слоя болот Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1. С. 14–29. **11.** *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с. **12.** *Романов В. В.* Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1961. 359 с. **13.** Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука, 1966. 259 с. **14.** *Порхаев Г. В., Фельдман Г. М., Федорович Д. И.* Теплофизика промерзающих и протаивающих грунтов. М.: Наука,1964. 197 с.

Сведения об авторах

Калюжный Игорь Леонидович — кандидат технических наук, заведующий гидрофизической лабораторией Государственного гидрологического института
E-mail: hfl@mail.ru
Лавров Сергей Алексеевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник гидрофизической лаборатории Государственного гидрологического института
E-mail: lavrov@ecopro.spb.ru

Author Affiliation

Igor L. Kalyuzhny — PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Hydrophysics of the State Hydrological Institute
E-mail: hfl@mail.ru
Sergey A. Lavrov — Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Hydrophysics of the State Hydrological Institute
E–mail: lavrov@ecopro.spb.ru

Библиографическое описание статьи

Калюжный, И. Л. Теплофизические свойства деятельного слоя болот Кольского полуострова / *И. Л. Калюжный, С. А. Лавров* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 16–28.

Reference

Kalyuzhny Igor L., Lavrov Sergey A. Thermophysical Properties of the Active Layer of the Kola Peninsula Bogs. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 16–28. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.29-33
УДК 622.807:622.271

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ И СНИЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ САМОВОЗГОРАНИЯ ПОРОДЫ ВО ВНУТРЕННИХ ОТВАЛАХ И ШТАБЕЛЯХ ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

С. В. Ковшов, А. В. Пасынков
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Выполнен анализ причин формирования повышенной аэротехногенной нагрузки от автомобильных дорог, а также факторов, определяющих процессы самовозгорания породы при отвалообразовании и хранении. В качестве ключевого технологического элемента решения обеих проблем предлагается применение модифицированной системы распыления воды с помощью поливооросительных машин. Эффективность представляемой системы определяется уменьшением размера капель воды за счет мелкодиспергированного форсуночного орошения.

Ключевые слова:
пылеподавление, пыль, самовозгорание, штабель угля, внутренний отвал, эндогенный пожар, поливооросительные машины.

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR DUST SUPPRESSION AND REDUCING THE PROBABILITY OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF ROCKS IN INTERNAL DUMPS AND STACKS WHEN CONDUCTING OPEN-PIT MINING OPERATIONS

Stanislav V. Kovshov, Andrei V. Pasynkov
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstract

The article presents an analysis of the reasons for increased aerotechnogenic load from roads, as well as the factors that determine the processes of rock self-ignition during dumping and storage. As a key technological element for solving both problems, it is proposed to use a modified water spray system using water splinkler carses. The effectiveness of the proposed system is determined by the reduction in the size of water droplets due to finely dispersed nozzle irrigation. It has been established that the effective irrigation cycle of roads in quarries and coal mines in Southern Siberia is 100–120 minutes. In order to extinguish the flames of ignition of internal dumps and stacks of coal, it is proposed to use a foam generator mounted on large-capacity watering sprinklers. The multiplicity of the foam formed is at least 6, and its range can reach 35–45 m.

Keywords:
dust suppression, dust, spontaneous combustion, coal stack, internal dump, endogenous fire, water splinkler car.

Введение

На современном этапе развития производства открытые горные работы на угольных разрезах характеризуются значительным ростом объемов добычи полезных ископаемых, что порождает интенсивное обновление парка горнодобывающей техники, рост тоннажа транспортных машин, увеличение количества пунктов складирования и перегрузки горной массы. Негативным последствием такого роста при этом становится интенсификация проявления различных вредных и опасных производственных факторов, включая возрастание концентрации пыли и вредных газообразных примесей воздуха в рабочей зоне, виброакустической нагрузки и др.

Анализ статистических данных показывает значительный рост эндогенных пожаров, обусловленных самовозгоранием угля на открытых угольных складах и внутренних отвалах, причиной которого становится сочетание следующих факторов: рост объема складируемой

горючей горной массы, открытый доступ кислорода, интенсификация тепловых процессов внутри горной массы, химическая активность угля, технологические ошибки при формировании штабелей угля или внутренних отвалов.

Результатом таких эндогенных пожаров, несмотря на их небольшие размеры, могут стать:

- увеличение объемов CO и CO_2, серы и зольных частиц в атмосфере как рабочего пространства, так и прилегающих к разрезу территорий;
- термическое травмирование (ожоги) персонала угольных разрезов, а также повреждение техники и оборудования;
- снижение качества или частичная потеря складируемой товарной продукции.

В качестве основных нормативных документов, регламентирующих сферу борьбы с самовозгоранием угля и вскрышных пород на угольных разрезах, выступают Временное руководство по профилактике и тушению эндогенных пожаров на разрезах [1], а также приказ № 517 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16.12.2015 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля» [2].

Основными источниками пылеобразования и пылепереноса на угольных разрезах выступают буровзрывные работы, экскавация и погрузка, транспортировка горной массы по автомобильным дорогам.

Основным нормативным документом, регламентирующим сферу борьбы с пылью на угольных разрезах, являются ПБ 05-619-03 «Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом» [3], в которых особое внимание уделяется поливу технологических дорог и гидрозабойке скважин, подготовленных по взрыв пласта.

Материал и методика исследований

Существующие технологии решения данных проблем трудоемки и ресурсоемки, а зачастую являются опасными. При этом, несмотря на наличие значительного количества технических решений, самым распространенным остается орошение водой с помощью поливооросительных машин. Часто бывает так, что задачи по тушению эндогенных пожаров (очагов самовозгорания угля) и снижению запыленности от автомобильных дорог возложены на сотрудников одного и того же участка (иного структурного подразделения) угольного разреза. Возникшие эндогенные пожары тушатся только в случае обнаружения очага воспламенения, а частота поливов автодорог зависит от многих факторов, прежде всего от температуры и влажности воздуха, и практически должна составлять раз в 100–120 мин каждый участок автодороги.

Обычно поливооросительная машина состоит из емкости для воды в виде цистерны или иной сварной емкости, насосного оборудования, трубопроводов, питающих водой форсунки, находящиеся сзади. Дополнительно иногда устанавливаются боковые форсунки. В зависимости от объема поливооросительные машины подразделяются на малотоннажные (объем цистерны не превышает 15–20 $м^3$) и крупнотоннажные (объем цистерны может достигать до 60–70 $м^3$). Малотоннажные поливооросительные машины обычно комплектуются на базе автомобилей КамАЗ (рис. 1, *а*), «Урал» и ГАЗ, более крупные емкости устанавливают на грузовые автомобили БелАЗ (рис. 1, *б*). В целях тушения очагов самовозгорания угля на некоторые поливооросительные машины устанавливаются специальные водяные пушки, которые могут поворачиваться, отклоняться как по горизонтали, так и по вертикали. Такие водяные пушки управляются оператором из кабины.

Для распыления воды на поливооросительные машины обычно устанавливают форсунки с плоским факелом распыла, при этом они всегда остаются неподвижными. Реже используются форсунки с более сложной конструкцией. Форсунки с простой конструкцией устанавливают, просверлив специальные отверстия в водопроводном патрубке с нижней стороны. Эти патрубки в целях экономии располагают в задней части автомобиля ниже уровня цистерны так, чтобы вода самотеком стекала в патрубок. Альтернативный вариант состоит в прорезании горизонтальных щелей в концах труб, располагающихся по углам поливооросительных машин. Основное

требование при этом состоит в том, чтобы отсутствовал или сводился к минимуму перекрестный поток воды. Иногда имеется опция включения каждой форсунки по отдельности, что может облегчить задачу по управлению распылением воды.

а *б*

Рис. 1. Поливооросительные машины на базе автомобилей КамАЗ (*а*) и БелАЗ (*б*)
Fig. 1. Water splinkler cars: based on KamAZ (*а*), BelAZ (*б*)

Результаты и их обсуждение

Для тушения эндогенных пожаров на крупнотоннажных поливооросительных машинах разработана модель пеногенераторной установки [4]. Пеногенераторная установка включает емкость для пенообразователя, воздушно-пенный ствол с дистанционным приводом, пеносмеситель и вспомогательную запорно-регулировочную арматуру. Технические характеристики устройства приведены ниже.

Технические характеристики пеногенераторной установки

Кратность пены (в режиме работы пеногенератора), не менее	6
Дальность вылета пены, м	40
Перемещение ствола в горизонтальной плоскости, град.	35±1
Перемещение ствола по вертикали, град.	–15…+45
Условный проход соединительных головок, мм	80

Цистерна поливооросительной машины сварная и разделена на отсеки, ее заправка производится через верхние люки от гидрантов. Для обеспечения безопасного обслуживания, включая подъем оператора, на цистернах монтируют лестницу и поручни.

Опыт исследований, проведенных на различных угольных разрезах Южной Сибири, а также данные ведущих отечественных и зарубежных специалистов показывают, что использование воды для борьбы с пылью на автодорогах в длительной временной перспективе существенно не решают этой проблемы. Актуальными становятся технические решения, которые либо меняют существующие механизмы пролива воды, либо обеспечивают замену воды на растворы различных веществ, обладающих высокой смачивающей способностью, позволяющей увеличивать период высыхания, или способных образовывать защитные пленки.

В качестве решения, позволяющего эффективно решить проблему запыленности от автомобильных дорог, в Санкт-Петербургском горном университете разработана 3D-модель поливооросительной машины, в которой основной доработкой является включение системы туманообразования, устанавливаемой на раме в верхней части задней стороны автомобиля (рис. 2) [5]. Эта рама крепится к корпусу с помощью специальной пластины, через которую проходят патрубки, питающие систему водой. Подобное устройство туманообразования позволяет адресно увлажнять не только дорожное полотно, но и воздух в зоне дыхания персонала угольных разрезов, нейтрализуя наиболее вредную респирабельную фракцию пыли.

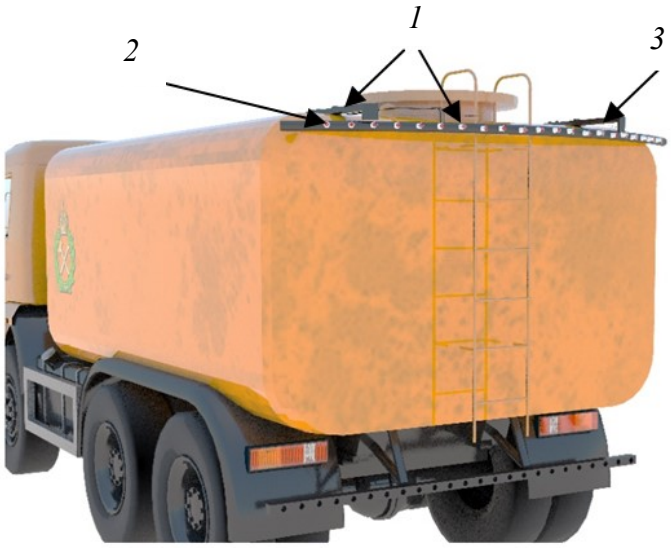


Рис. 2. 3D-модель поливооросительной машины с системой туманообразования:
1 — система туманообразования; *2* — рама, на которой устанавливается система;
3 — пластина для крепления рамы к цистерне

Fig. 2. 3D model of water splinkler car with fogging system:
1 — fogging system; *2* — frame for fogging system; *3* — plate for attaching the frame to the water tank

Согласно проведенным расчетам, средний расход воды при одновременной работе всех компонентов разработанной системы комплексного обеспыливания и тушения очагов самовозгорания составляет 270 л/мин. Однако такой сценарий маловероятен, потому что ситуация, когда одновременно тушат эндогенные пожары и проводят противопылевые мероприятия, возникает редко. Технико-экономический анализ показывает, что затраты на переоборудование стандартной поливооросительной машины системами пеногенерации и туманообразования составляют около 780 тыс. руб., а расходы на их годовое обслуживание — 180–190 тыс. руб.

Выводы

1. Современный этап развития открытых горных работ на угольных разрезах характеризуется увеличением случаев самовозгорания угля и породы во внутренних отвалах и штабелях, а также значительным ростом пылеобразования и пылепереноса.
2. Основной формой решения данных проблем выступает применение поливооросительных машин, однако их механизмы распыления и орошения являются малоэффективными.
3. В качестве механизма повышения эффективности предлагается использовать системы мелкодиспергированного форсуночного орошения или туманообразования, которые рационально размещать в верхней части задней стороны автомобиля.
4. В целях повышения эффективности мероприятий по тушению эндогенных пожаров, обусловленных самовозгоранием угля и породы во внутренних отвалах и штабелях, рекомендовано применение специальной пеногенераторной установки на крупнотоннажных поливооросительных машинах.
5. Технико-экономический анализ показывает, что затраты на переоборудование стандартной поливооросительной машины системами пеногенерации и туманообразования составляют примерно 780 тыс. руб., а на их годовое обслуживание потребуется 180–190 тыс. руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Временное руководство по профилактике и тушению эндогенных пожаров на разрезах. Челябинск: НИИОГР, 1982. 92 с. **2.** Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16.12.2015 № 517. URL: http://docs.cntd.ru/document/420327887. 3. ПБ 05-619-03 «Правила безопасности при

разработке угольных месторождений открытым способом». URL: https://files.stroyinf.ru/Data1/39/39969. **4.** Поливооросительные машины. URL: http://tdbelaz.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=329:polivoorositelnye-mashiny&catid=1:novosti-i-sobytiya&Itemid=117. **5.** *Сафина А. М.* Обоснование параметров снижения запыленности автодорог угольного разреза // Глобальная энергетика: партнерство и устойчивое развитие стран и технологий: сб. науч.-практ. конф. в рамках Форума проектов программ Союзного государства — VI Форума вузов инженерно-технологического профиля, 24–28 октября 2017 г. Минск: БНТУ, 2018. С. 61–64.

Сведения об авторах

Ковшов Станислав Вячеславович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: Kovshov_SV@pers.spmi.ru
Пасынков Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности производств Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: Pasynkov_AV@pers.spmi.ru

Author Affiliation

Stanislav V. Kovshov — PhD (Engineering), Docent, Associate Professor of the Industrial Safety Department of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: Kovshov_SV@pers.spmi.ru
Andrey V. Pasynkov — PhD (Engineering), Associate Professor of the Industrial Safety Department of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: Pasynkov_AV@pers.spmi.ru

Библиографическое описание статьи

Ковшов, С. В. Ресурсосберегающие технологии пылеподавления и снижения вероятности самовозгорания породы во внутренних отвалах и штабелях при ведении открытых горных работ / *С. В. Ковшов, А. В. Пасынков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 29–33.

Reference

Kovshov Stanislav V., Pasynkov Andrey V. Resource-Saving Technologies for Dust Suppression and Reducing the Probability of Spontaneous Combustion of Rocks in Internal Dumps and Stacks when Conducting Open-Pit Mining Operations. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 29–33. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.34-39
УДК 622.7

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПЕРЕРАБОТКЕ ОЛОВОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

С. А. Корчевенков, С. И. Герасименко
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Работа посвящена исследованию доводки объединенного гравитационного оловянного концентрата Солнечной обогатительной фабрики до требований, удовлетворяющих марке КО-1, ГОСТ 22221-76 и выше.

Для достижения заданных показателей проведены опыты флотационного обогащения с получением сульфидного концентрата, шеелитового и камерного продуктов, являющихся касситеритовым концентратом. Проведены эксперименты по высокоинтенсивной магнитной сепарации на камерном продукте. Максимально удалены вредные примеси, получен оловянный концентрат качеством выше ГОСТ 22221-76.

Ключевые слова:

касситерит, олово, шеелит, железо, флотация, сепарация, вольфрамит.

MODERN APPROACHES TO THE PROCESSING OF TIN-CONTAINING RAW MATERIALS

Stepan A. Korchevenkov, Sergei I. Gerasimenko
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstract

The work is devoted to the study of refining the combined gravitational tin concentrate of a Solar concentrator to the requirements that meet the KO-1 mark, GOST 22221-76 and higher.

Flotation enrichment experiments were performed to achieve the set parameters with the production of sulfide concentrate, scheelite and chamber products that are cassiterite concentrate. Experiments on high-intensity magnetic separation on a chamber product were performed. Harmful impurities were removed as much as possible, and tin concentrate was obtained with a quality higher than GOST 22221-76.

Keywords:

cassiterite, tin, scheelite, iron, flotation, separation, wolframite.

Введение

Промышленное значение олова — получение белой жести (луженое железо), используемой при изготовлении тары для пищевых продуктов, в припоях для электроники, а также в качестве нетоксичной присадки в металлургии [1]. Основным минералом-концентратором олова является касситерит — тяжелый минерал, с удельным весом около 7 г/см^3, с содержанием олова в нем — 78,62 %. Оловянные руды можно обогащать по такой же схеме, что и вольфрамовые. Основными методами обогащения являются гравитационные. Больше всего потерь при гравитационном обогащении приходится на шламы [2]. Если же минералом-концентратором олова являются сульфиды, то оно извлекается при флотации вместе с другими сульфидами, преимущественно в свинцовый концентрат.

Касситеритовые концентраты высшей марки КО-1, ГОСТ № 22221-76 получить путем только гравитационного обогащения не представляется возможным из-за высоких требований по минимальному содержанию примесей, таких как трехокись вольфрама, сера, мышьяк и железо. В большинстве промышленных месторождений касситерита представлены минералы «спутники» касситерита: шеелит — как источник «вредного» компонента вольфрама; арсенопирит — мышьяк, железо, сера; станнин, хоть и являющийся вторым по распространенности минералом олова, тоже несет в себе медь, железо и серу.

Целью данного исследования является разработка комбинированной флотационно-магнитной схемы обогащения для доводки оловянного гравитационного концентрата, чтобы повысить его качество.

Материал и методика исследований

Объектом исследования в данной работе являлся гравитационный оловянный концентрат Солнечной обогатительной фабрики.

Минералогический состав (рис. 1) представлен в основном касситеритом — 69,7 %. Вольфрам представлен двумя минералами — шеелитом и вольфрамитом, до 15 %. Из сульфидных минералов присутствует, арсенопирит и пирит — 1,5 и 1,1 % соответственно. Остальное — обломочные породы, магнетит, кварц, турмалин.

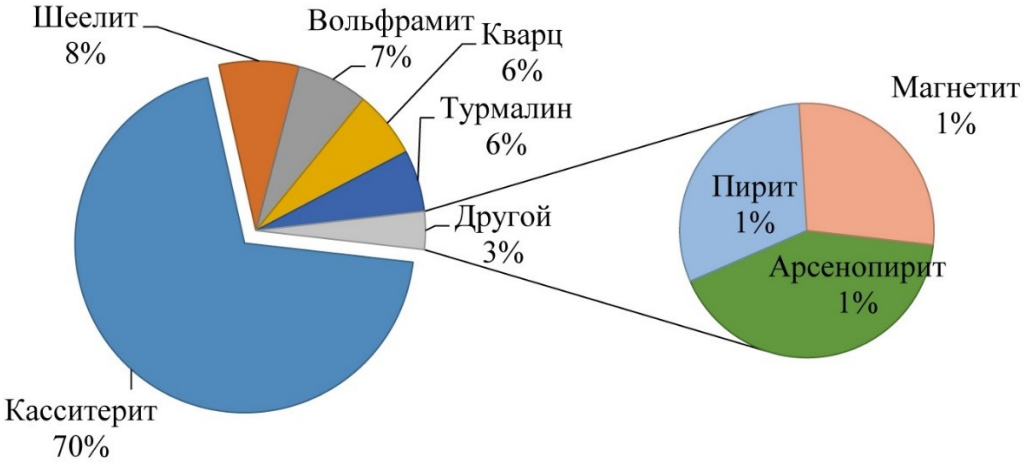


Рис. 1. Минералогический состав оловянного концентрата

Fig. 1. Mineral distribution of tin concentrate

На диаграмме (рис. 2) приведено распределение вольфрама по классам крупности. Доизмельчение концентрата необходимо, так как полученный продукт отличается существенной долей сростков (рис. 3).

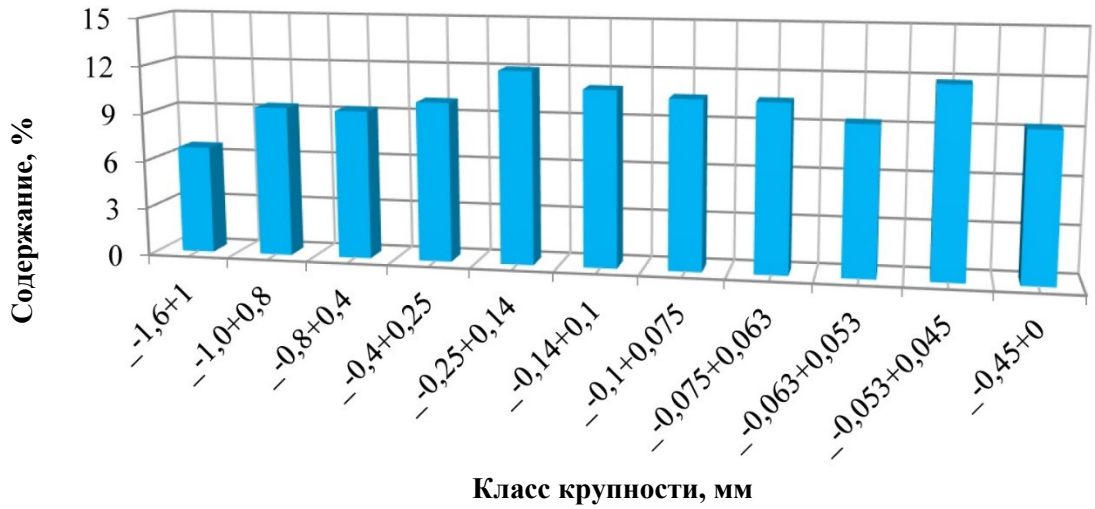


Рис. 2. Содержание WO_3 по классам крупности

Fig. 2. Grade WO_3 distribution by size fraction

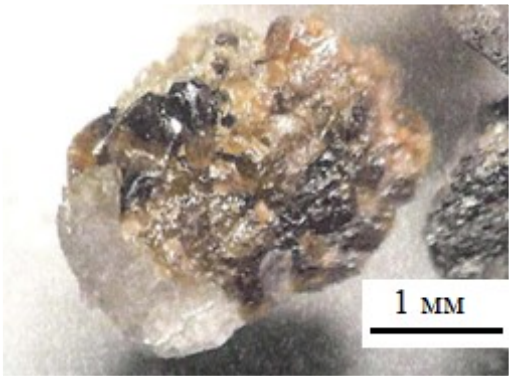


Рис. 3. Сросток касситерита с кварцем
Fig. 3. Cassiterite and silica aggregate

Результаты и их обсуждение

Исходная навеска измельчалась до крупности 85 % класса –0,074 мм, что обусловлено полным раскрытием касситерита и вольфрамовых минералов (рис. 4).

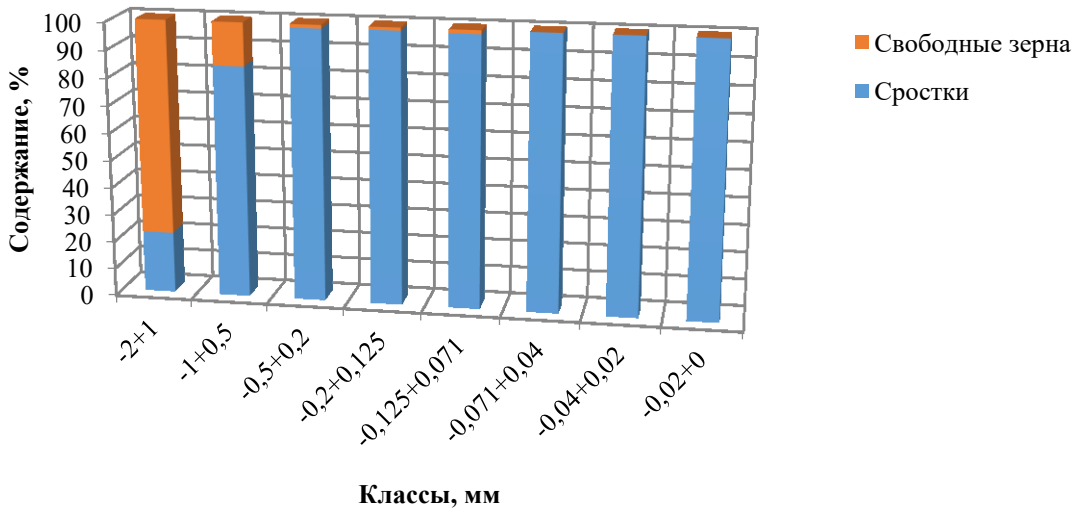


Рис. 4. Степень раскрытия сростков
Fig. 4. Cassiterite liberation by size

Сульфидная флотация

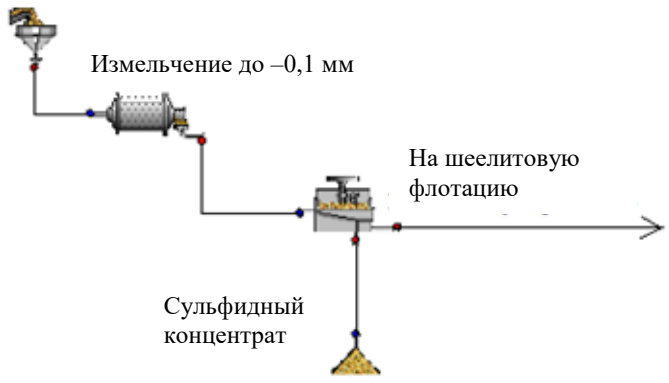


Рис. 5. Схема проведения флотации сульфидных минералов
Fig. 5. Flowsheet of sulfide flotation

Флотация проводилась при pH, равном 10,5. Чтобы извлечь сульфидные минералы (снижение содержания железа и мышьяка), была проведена сульфидная флотация. Собирателем в данной стадии являлся бутиловый ксантогенат калия, депрессором — жидкое стекло. Регулятор среды — сода [3]. Схема экспериментов представлена на рис. 5.

Результаты сравнения разных расходов бутилового ксантогената калия представлены ниже (рис. 6). Из данной диаграммы видно, что при расходе 100 г/т показатели наиболее оптимальны.

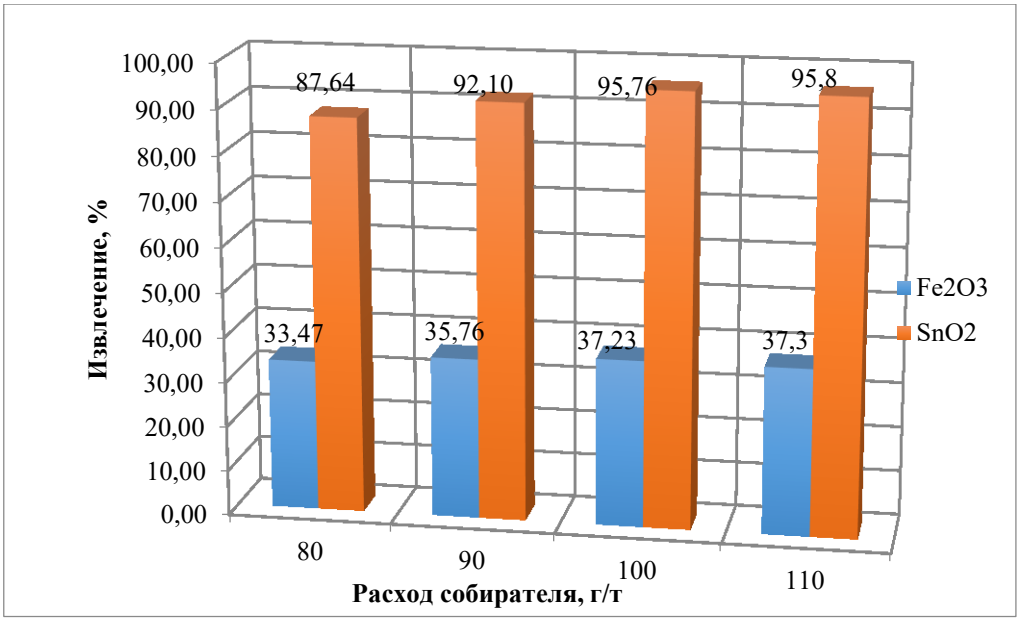


Рис. 6. Сравнение расходов собирателя сульфидной флотации

Fig. 6. Comparing of collector consumption in sulfide flotation

Шеелитовая флотация

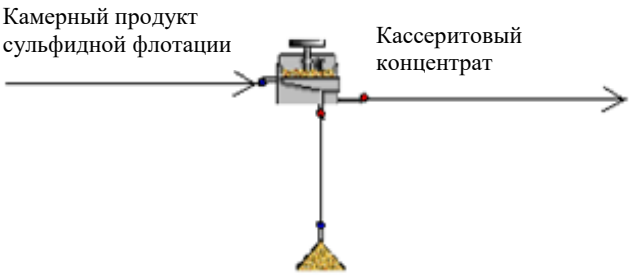


Рис. 7. Схема проведения флотации шеелита

Fig. 7. Flowsheet of flotation test

Камерный продукт сульфидной флотации поступает на шеелитовую флотацию (рис. 7).

На основании проведенного обзора для флотации шеелита были выбраны два собирателя: олеат натрия и эмульсия ДТМ с керосином в соотношении 3:1, для них определена дробная подача [4–8].

На рис. 8 представлены диаграммы процесса извлечения триокиси вольфрама и оксида олова в пенный и камерный продукт в зависимости от используемого при этом собирателя. Выбор был сделан в пользу эмульсии, так как ею проявлены более селективные собирательные свойства по отношению к шеелиту. Депрессор касситерита — желтый декстрин. Была использована дробная подача реагентов. Данный вид подачи показал наилучшие результаты, получены три флотационных концентрата; результаты представлены в табл. 1.

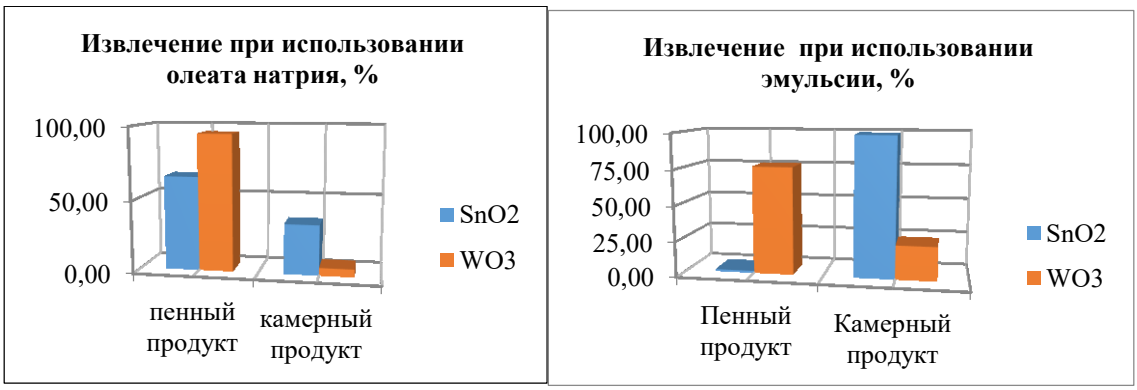


Рис. 8. Результаты экспериментов по исследованию процесса флотации шеелита

Fig. 8. Experimental results of scheelite flotation

Таблица 1
Table 1

Результаты флотации сульфидного и шеелитового циклов
Results of flotation of sulfide and scheelite cycles

Концентрат Concentrate	γ, %	Содержание, % Content, %				Извлечение, % Extraction, %			
		WO_3	SnO_2	Fe_2O_3	As_2O_3	WO_3	SnO_2	Fe_2O_3	As_2O_3
Сульфидный Sulfide	6,84	4,30	15,00	27,86	18,80	3,73	1,48	16,61	81,41
Шеелитовый Scheelite	13,37	43,89	23,31	15,82	1,60	74,38	4,51	18,43	13,54
Касситеритовый Cassiterite	79,79	2,16	81,39	9,34	0,10	21,88	94,00	64,96	5,05
Исходное Initial	100,00	7,89	69,08	11,47	1,58	100,00	100,00	100,00	100,00

Полученные данные по химическому составу касситеритового концентрата удовлетворяют требованиям марки КО-2, ГОСТ № 22221-76.

Высокоградиетная сепарация

Для доизвлечения из камерного продукта оксидов железа и вольфрама проведена мокрая высокоинтенсивная магнитная сепарация на лабораторном сепараторе Slon 100 при индукции поля 0,7 Тл, пульсациях воды 250 мин$^{-1}$, расходе воды 10 л/мин; матрица 6 мм. Полученные результаты сепарации приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты магнитной сепарации
Results of magnetic separation

Продукт Product	γ, %*	Содержание, % Content, %				Извлечение, % Extraction, %			
		WO_3	SnO_2	Fe_2O_3	As_2O_3	WO_3	SnO_2	Fe_2O_3	As_2O_3
Немагнитный Non-magnetic	62,01	0,70	95,80	1,75	0,07	4,38	68,61	7,55	2,19
Магнитный продукт Magnetic product	37,99	4,55	58,00	21,70	0,15	17,49	25,45	57,32	2,78
Исходное Initial	100,00	2,53	74,15	11,31	0,10	21,87	94,06	64,87	4,97

* Относительно полученного касситеритового концентрата.

Заключение

Установлена возможность получения касситеритового концентрата высокого качества — выше требований ГОСТ № 22221-76 — по схеме с предварительной сульфидной флотацией, последующей шеелитовой флотацией и магнитной сепарацией камерного продукта. Немагнитный продукт по качеству превышает требования к касситеритовому концентрату марки КО-1 при содержании оксида олова 95,8 % (74,4 % Sn) и извлечении 68,6 %. Концентрации примесей в виде оксида железа, вольфрама и мышьяка составляют 1,75, 0,70 и 0,07 % соответственно.

Подобранные реагентные режимы и параметры флотации позволяют также получить вольфрамовый концентрат с содержанием 43,9 % WO_3.

Комбинация мокрой высокоинтенсивной магнитной сепарации и флотации позволяет технологически эффективно доводить получаемый на фабрике гравитационный оловянный концентрат при малом количестве стадий до высоких содержаний олова, а также минимизировать примеси, что приводит к значительному увеличению стоимости такого концентрата.

ЛИТЕРАТУРА
1. *Медведев А., Шкундина С.* Иммерсионное олово. Прошлое и будущее // Технологии в электронной промышленности. 2010. №. 3. С. 22–27. **2.** *Берт Р. О*. Технология гравитационного обогащения. М.: Недра, 1990. 572 с. **3.** Справочник по обогащению руд: основные процессы / под ред. *О. С. Богданова*. М.: Недра, 1983. 381 с. **4.** *Шепета Е. Д., Игнаткина В. А., Саматова Л. А.* Повышение контрастности свойств кальцийсодержащих минералов при флотации шеелит-карбонатных руд // Обогащение руд. 2017. №. 3. С. 41–48. **5.** Теория и технология флотации руд / *О. С. Богданов [и др.].* М.: Недра, 1990. 363 с. **6.** Минералого-технологические особенности руд шеелитового месторождения Скрытого и перспективы их обогащения (Приморский край) / *Л. А. Саматова [и др.]* // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 6. С. 83–95. **7.** *Саматова Л. А., Шепета Е. Д., Киенко Л. А.* Кинетика флотации кальциевых минералов при обогащении комплексных шеелитовых руд // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2011). 2011. С. 505–509. **8.** *Саматова Л. А., Шепета Е. Д.* Перспективы применения олеил-саркозинатов в собирательных смесях при флотации бедных шеелитовых руд // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения — 2012). 2012. С. 220–223.

Сведения об авторах
Корчевенков Степан Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: stepan_korcheven@mail.ru
Герасименко Сергей Иванович — студент Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: gerasimenkosergei777@gmail.com

Author affiliation
Stepan A. Korchevenkov — PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Mineral Processing of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: stepan_korcheven@mail.ru
Sergey I. Gerasimenko — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: gerasimenkosergei777@gmail.com

Библиографическое описание статьи
Корчевенков, С. А. Современные подходы к переработке оловосодержащего сырья / *С. А. Корчевенков, С. И. Герасименко* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 34–39.

Reference
Korchevenkov Stepan A., Gerasimenko Sergey I. Modern Approaches to the Processing of Tin-Containing Raw Materials. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 34–39. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.40-49
УДК 621.039.4

НАКОПЛЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ^{134}Cs и ^{154}Eu В РЕАКТОРАХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В. А. Наумов, С. А. Гусак
ФГБУН Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

Аннотация

Представлены результаты расчетно-теоретических исследований накопления ^{134}Cs и ^{154}Eu в водо-водяных (АБВ, «Унитерм», КЛТ-40С, РИТМ-200М) и жидкометаллических (СВБР-100) реакторах атомных станций малой мощности. Определены масса и активность ^{134}Cs и ^{154}Eu на конец кампании реакторов различного типа. Установлена сильная зависимость накопления радионуклидов от спектра нейтронов в активных зонах реакторов.

На примере металлобетонного контейнера ТУК-120, загруженного облученным топливом реактора типа АБВ, на основе данных по активности ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu выполнено математическое моделирование процесса прохождения ионизирующего излучения через биологическую защиту контейнера. Определено, что относительный вклад ^{134}Cs и ^{154}Eu в полную мощность дозы γ-излучения увеличивается по толщине защиты — от 10 % на ее внутренней поверхности до 65 % на внешней поверхности. Полученные данные показывают большую значимость этих радионуклидов в формировании дозовых характеристик поля γ-излучения вблизи контейнера.

Ключевые слова:

атомные станции малой мощности, отработавшее ядерное топливо, продукты деления, контейнер ТУК-120, гамма-излучение, радиационная безопасность.

ACCUMULATION OF GAMMA-EMITTING RADIONUCLIDES ^{134}Cs AND ^{154}Eu IN REACTORS OF SMALL NUCLEAR POWER PLANTS

Vadim A. Naumov, Sergey A. Gusak
Mining Institute of FRC KSC RAS, Apatity

Abstract

The paper presents the study results of computational and theoretical studies of the accumulation of ^{134}Cs and ^{154}Eu in reactors of small nuclear power plants — light water reactors (ABV, Uniterm, KLT-40S, RITM-200M) and liquid metal cooled reactors (SVBR-100). The mass and activity of ^{134}Cs and ^{154}Eu at the end of reactors campaign of various types are determined. We found a strong dependence of the accumulation of radionuclides on the neutron spectrum in the reactor cores.

On the example of the TUK-120 metal-concrete container loaded with irradiated fuel of the ABV reactor, on the basis of data on the activity of ^{134}Cs, ^{137}Cs and ^{154}Eu mathematical modeling of the passage of ionizing radiation through the biological protection of the container has been carried out. It was determined that the relative contribution of ^{134}Cs and ^{154}Eu to the total dose rate of gamma radiation increases by the thickness of the protection — from 10 % on its inner surface to 65 % on the outer surface. The obtained data show great importance of these radionuclides in the formation of dose characteristics of the gamma radiation field near the container.

Keywords:

small nuclear power plants, spent nuclear fuel, fission products, TUK-120 container, gamma radiation, radiation safety.

Введение

В последние годы в России и мире наблюдается повышенный интерес к созданию атомных станций малой мощности (АСММ) и их востребованность. Головными проектными организациями атомной отрасли России разработаны различные проекты ядерных реакторов для малой энергетики, которые показали, что реакторные установки (РУ) малой мощности и атомные станции на их основе имеют значительный потенциал для освоения новых и перспективных для атомной энергетики сегментов рынка, каким является энергоснабжение отдаленных или изолированных районов [1]. Так, «ОКБМ Африкантов» на основе технологий атомного судостроения разработало проекты плавучих

и стационарных наземных АСММ с легководными РУ типа АБВ, КЛТ-40С и РИТМ-200М. АО «НИКИЭТ» тоже подготовило технические предложения по созданию АСММ на основе РУ водо-водяного типа («Унитерм»), а ОКБ «Гидропресс» и ГНЦ РФ-ФЭИ разработали технические проекты и предложения по созданию АСММ с реакторами на быстрых нейтронах типа СВБР-100 и СВБР-10.

По результатам проектных разработок показано, что такие энергоисточники отличаются от атомных станций большой мощности компактностью, сокращенным периодом строительства, повышенным уровнем безопасности. Заявляемые разработчиками технико-экономические показатели АСММ позволяют говорить об их конкурентоспособности по сравнению с традиционными источниками для энергоснабжения потребителей на удаленных и труднодоступных территориях. Государственная программа инновационного развития и технической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 г. предполагает разработку технологий и создание линейки реакторов малой мощности, применение АСММ в Арктике и на Дальнем Востоке [2].

Современное состояние проблематики создания АСММ характеризуется различной степенью готовности к практической реализации предлагаемых проектов, которые отличаются имеющимся заделом в проектной и производственной части, объемом дополнительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Важным этапом на этой стадии является рассмотрение вопросов, связанных с хранением и транспортированием отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В зависимости от типа и мощности РУ предлагаются различные концепции. Например, для ОЯТ атомного флота разработана и реализована на практике концепция с использованием металлических (ТК-18) и двухцелевых (перевозка и хранение) металлобетонных (ТУК-108/1 и ТУК-120) контейнеров. Эта концепция может быть применена к ОЯТ реакторов АСММ, проекты которых базируются на технологиях атомного судостроения.

Одной из основных проблем при хранении и транспортировании ОЯТ в контейнерах является обеспечение радиационной безопасности. Изучение этой научно-технической проблемы на стадиях НИР [3] и при проектировании [4, 5] показывает, что дозовые характеристики поля ионизирующего излучения в окрестности контейнера определяются гамма-квантами, испускаемыми продуктами деления (ПД) в ОЯТ, в основном ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu.

Следует отметить, что работы по оценке накопления ^{137}Cs в ОЯТ реакторов АСММ были выполнены авторами в рамках исследований радионуклидного состава облученного топлива с использованием специализированной реакторной программы «КРАТЕР», результаты которых представлены в статье [6]. Недостатком исследований радиоактивности ОЯТ реакторов АСММ, выполненных с помощью программы «КРАТЕР», является неполнота информации о радиоактивности гамма-излучающих радионуклидов. В частности, в данной программе отсутствует алгоритм накопления радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu.

Целью настоящей статьи является расчетно-теоретическая оценка накопления этих дозообразующих радионуклидов в облученном топливе при эксплуатации реакторов АСММ различного типа и выявление их значимости в формировании дозовых характеристик поля ионизирующего излучения на поверхности контейнера с ОЯТ.

Методика и результаты исследования

Решение поставленной задачи базировалось на ряде упрощений, которые касаются представления плотности потока нейтронов, нейтронных поперечных сечений и схем распада продуктов деления:

- активная зона реактора представляется конечным числом цилиндрических слоев и среднее по слою абсолютное значение плотности потока нейтронов, относительно которой записано уравнение кинетики накопления ПД, определяется в расчетах по программе «КРАТЕР» последовательно на временных шагах, на которые разбивается эксплуатационный цикл активной зоны;
- образование ^{134}Cs и ^{154}Eu в реакторах водо-водяного типа (АБВ, «Унитерм», РИТМ-200М) происходит в основном в области энергий нейтронов ниже 1 кэВ (группы 8, 9 и 10 в библиотеке

групповых констант программы «КРАТЕР»), а в реакторах на быстрых нейтронах типа СВБР — в интервале энергий от 1 до 700 кэВ (группы 5, 6 и 7);

- выходы ПД зависят от парциальных вкладов в полное число делений ядер ^{235}U, ^{238}U и ^{239}Pu. Значения независимых выходов нуклидов — продуктов деления определяются по данным работы [8], а постоянные распада — по данным библиотеки ENDF/B-VII.1 Decay data;
- схемы образования ^{134}Cs и ^{154}Eu заимствованы из справочника [7].

С учетом отмеченных упрощений накопление ПД можно описать системой уравнений, в которой *i*-е уравнение для числа ядер *i*-го нуклида $N_i(t)$ в слое активной зоны имеет вид [7]:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) - \sum_j \sigma_{ij}\Phi_j(t)N_i(t) + \overline{y}_i Q(t) + \lambda_m N_m(t) + \sum_j \sigma_{mj}\Phi_j(t)N(t),$$

где λ_i — постоянная распада *i*-го нуклида; λ_m — постоянная распада *m*-го нуклида (ядра-предшественника) в *i*-й нуклид; σ_{ij} — сечение поглощения *i*-го нуклида в энергетической группе *j*; $\Phi_j(t)$ — плотность потока нейтронов *j*-й группы в зоне топлива соответствующего слоя активной зоны; $\overline{y}_i$ — средневзвешенный независимый выход *i*-го нуклида при делении ядер ^{235}U, ^{238}U и ^{239}Pu; $Q(t)$ — скорость делений в зоне топлива соответствующего слоя активной зоны; σ_{mj} — сечение реакций поглощения нейтронов на *m*-м ядре с образованием *i*-го нуклида в группе *j*; $N_m(t)$ — число ядер *m*-го нуклида.

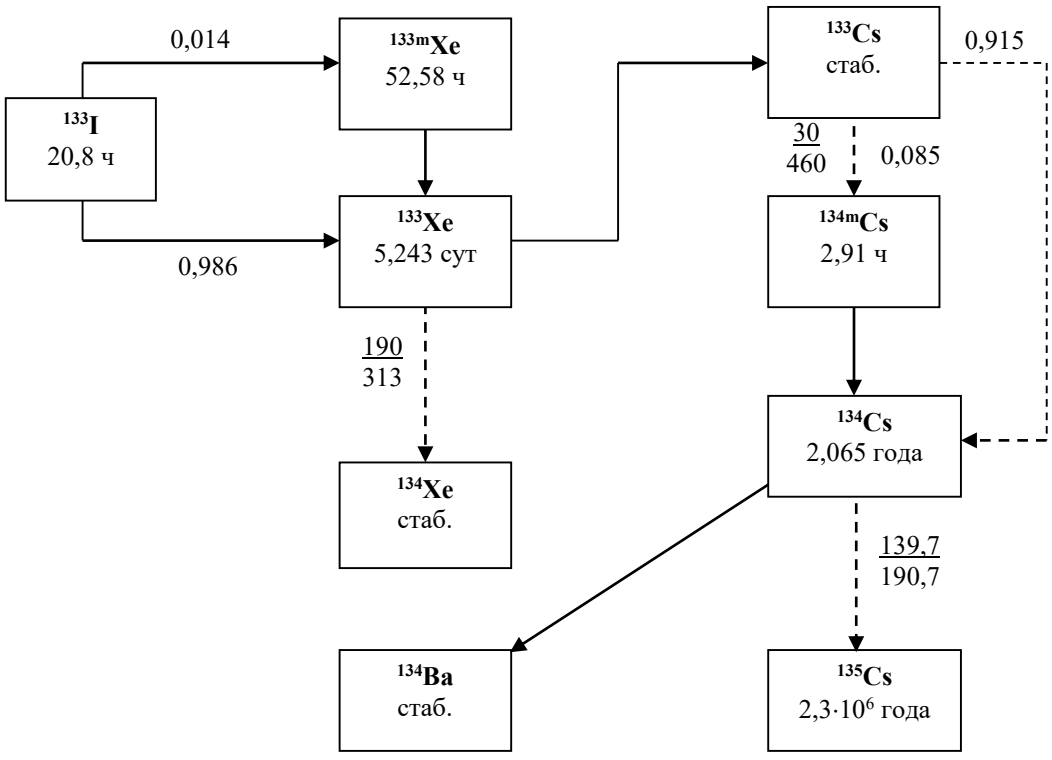


Рис. 1. Схема накопления ^{134}Cs [7]

Fig. 1. Scheme of ^{134}Cs accumulation [7]

При выполнении расчетов накопления нуклидов учитывался конкретный вид каждой изобарной цепочки. При этом в качестве абсолютного независимого выхода родоначальника цепочки использовался его кумулятивный выход, включающий в себя абсолютный выход рассматриваемого нуклида и сумму абсолютных выходов его предшественников, период полураспада которых составляет пренебрежительно малую величину по сравнению с расчетным шагом по времени. Так, например, в расчетах накопления ^{134}Cs в качестве родоначальника цепочки

принят ^{133}I, кумулятивный выход которого включает абсолютный выход самого нуклида и сумму абсолютных выходов радионуклидов предшественников ^{133}Sn, ^{133}Sb, ^{133m}Te, ^{133}Te и ^{133m}I. При таком подходе в расчетах рассматривалась схема накопления ^{134}Cs (рис. 1).

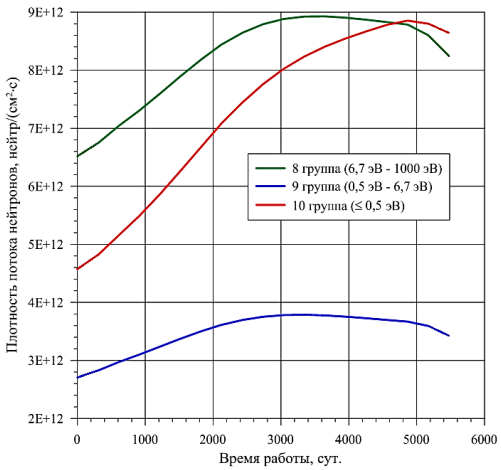


Рис. 2. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора «Унитерм» при мощности РУ 24,4 МВт

Fig. 2. Neutron flux density of various energy groups in the fuel for the central region of the Uniterm reactor core (the reactor facility capacity of 24,4 MW)

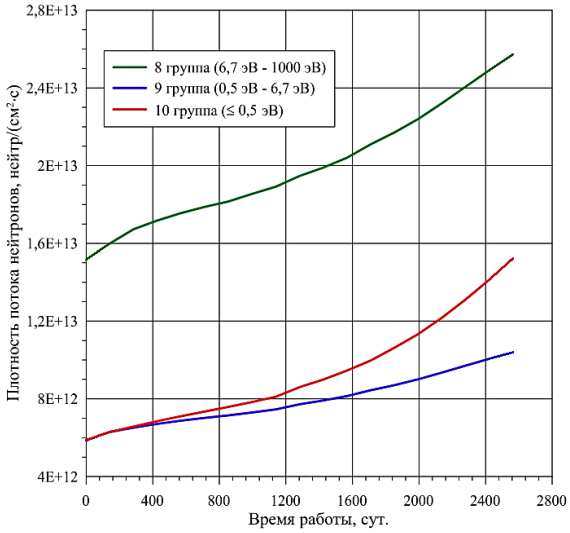


Рис. 3. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора РИТМ-200М при мощности РУ 113,8 МВт

Fig. 3. Neutron flux density of various energy groups in the fuel for the central region of the RITM-200M reactor core (the reactor facility capacity of 113,8 MW)

На рис. 1 приведены периоды полураспада нуклидов, коэффициенты ветвления и сечения реакций в тепловой и резонансной областях энергетического спектра. В соответствии с приведенной схемой накопление ^{134}Cs описывается системой из 6 дифференциальных уравнений. Аналогичный подход использован в расчетах накопления ^{154}Eu, которое определяется системой из 21 уравнения.

На основе рассмотренного алгоритма для расчета накопления ПД разработана математическая программа ACTFP (**ACT**ivity of **F**ission **P**roducts), основанная на использовании стандартной подпрограммы библиотеки NAG, реализующей решение задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутта — Мерсона.

Уравнения кинетики накопления ^{134}Cs и ^{154}Eu требуют дополнительных пояснений. Первое пояснение касается плотности потока нейтронов (ППН). Зависящая от времени функция ППН определяется с помощью программы «КРАТЕР» для реакторов водо-водяного типа и жидкометаллических реакторов. На рис. 2–4 в качестве иллюстрации показаны результаты расчетов ППН для групп нейтронов, определяющих основной вклад в скорость реакций поглощения нейтронов в ПД в центральной области активных зон реакторов «Унитерм», РИТМ-200М и СВБР-100.

Необходимо отметить следующие закономерности и особенности ППН в реакторах АСММ. Во-первых, наблюдается сильный рост ППН со временем, особенно для группы нейтронов тепловых энергий (10-я группа) в случае водо-водяных реакторов, которая увеличивается от начала к концу кампании в два и более раза.

Эта особенность объясняется значительным (примерно в 2,5 раза) выгоранием ^{235}U. В случае реактора типа СВБР-100 плотность потока нейтронов также растет со временем, увеличиваясь в 1,3–1,4 раза от начала к концу кампании, что соответствует уровню выгорания топлива в активной зоне. Во-вторых, нужно отметить относительно низкий уровень плотности потока тепловых и замедляющихся нейтронов для водо-водяных реакторов АСММ, который обусловлен низкой энергонапряженностью их активных зон.

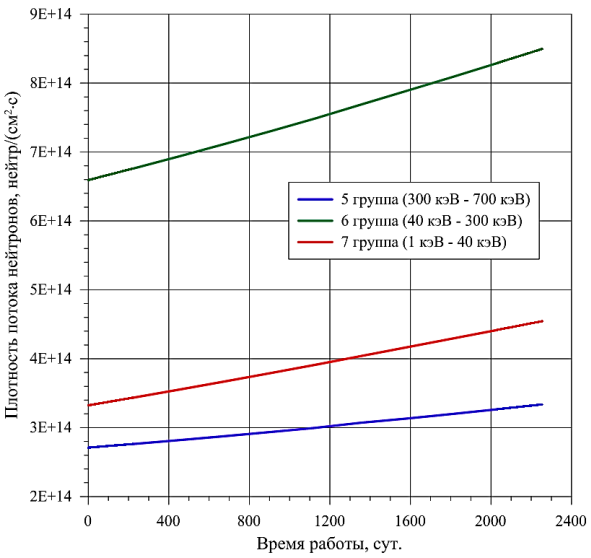


Рис. 4. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора СВБР-100 при мощности РУ 280 МВт

Fig. 4. Neutron flux density of various energy groups in the fuel for the central region of the SVBR-100 reactor core (the reactor facility capacity of 280 MW)

Второе пояснение относится к подготовке нейтронных поперечных сечений и других параметров цепочек образования ^{134}Cs и ^{154}Eu. В качестве исходной информации для расчета средних групповых сечений нейтронных реакций ПД использованы данные справочника [7] и библиотеки ENDF/B-VII.1. При этом значение сечений реакций для группы тепловых нейтронов определялось с учетом особенностей спектра ППН в тепловой области и температуры топлива в течение кампании реактора. Сечение реакций поглощения ПД в 5–9-й группах находилось осреднением по спектру 1/E. Параметры цепочек образования ^{134}Cs и ^{154}Eu в реакторах различного типа, использованные в расчетах, приведены в табл. 1–3.

Результаты расчетов накопления гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ активных зон жидкометаллических и водо-водяных реакторов на момент окончания их кампании приведены в табл. 4 и 5. В табл. 4 расчетные параметры даны в форме величины массы радионуклидов, нормированной на единицу энерговыработки активной зоны соответствующего реактора.

Таблица 1
Table 1

Параметры цепочки образования ^{134}Cs
Generation chain parameters of ^{134}Cs

Нуклид Nuclide	λ, $с^{-1}$ λ, s^{-1}	$\bar{y}$, %	$б_8$, барн $б_8$, barns	$б_9$, барн $б_9$, barns	$б_{10}$, барн $б_{10}$, barns
Водо-водяные реакторы / Light water reactors					
^{133}I	$9{,}254\cdot10^{-6}$	6,74	–	–	–
^{133}Xe	$1{,}529\cdot10^{-6}$	$2{,}02\cdot10^{-3}$	6,28	22,6	190
$^{133}Cs_{стаб}$ / $^{133}Cs_{stable}$	–	–	12,0	133,0	29,04
^{134}Cs	$1{,}064\cdot10^{-8}$	–	15,8	10,0	139,7
Реактор СВБР-100 / SVBR-100 reactor					
^{133}I	$9{,}254\cdot10^{-6}$	6,91	–	–	–
^{133}Xe	$1{,}529\cdot10^{-6}$	$1{,}68\cdot10^{-3}$	0,03	0,05	0,135
$^{133}Cs_{стаб}$ / $^{133}Cs_{stable}$	–	–	0,11	0,20	1,0
^{134}Cs	$1{,}064\cdot10^{-8}$	–	0,11	0,54	2,7

Наряду со значениями удельных масс рассматриваемых радионуклидов приведены значения удельных масс стабильных ядер ^{133}Cs и ^{153}Eu, что позволяет увидеть уровень конверсии стабильных ядер в радиоактивные. Кроме того, с целью выявления возможных различий в уровне накопления нуклидов в реакторах АСММ (по сравнению с реакторами средней и большой мощности) в табл. 4 приведены аналогичные показатели для реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, полученные по данным справочника [7].

Таблица 2
Table 2

Параметры цепочки образования ^{154}Eu в водо-водяных реакторах
Generation chain parameters of ^{154}Eu in the light water reactors

Нуклид Nuclide	λ, $с^{-1}$ λ, s^{-1}	$\bar{y}$, %	$б_8$, барн $б_8$, barns	$б_9$, барн $б_9$, barns	$б_{10}$, барн $б_{10}$, barns
^{147}Nd	$7{,}305\cdot10^{-7}$	2,22	81,9	50	440,6
$^{148}Nd_{стаб}$ / $^{148}Nd_{stable}$	–	1,68	0,22	1,95	18,69
$^{150}Nd_{ст}$ / $^{150}Nd_{stable}$	–	0,728	1,75	2,64	1,04
^{147}Pm	$8{,}376\cdot10^{-9}$	$1\cdot10^{-7}$	66,17	724	167,7
^{148m}Pm	$1{,}943\cdot10^{-7}$	$5{,}4\cdot10^{-8}$	200	1460	10618
^{148}Pm	$1{,}494\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-8}$	190,4	600	2000
^{149}Pm	$3{,}627\cdot10^{-6}$	1,12	150	315,7	1400
^{150}Pm	$7{,}183\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-4}$	–	–	–
^{151}Pm	$6{,}778\cdot10^{-6}$	0,478	60	1031,5	150
^{147}Sm	–	–	50	202,1	56,98
^{148}Sm	–	$1{,}08\cdot10^{-10}$	1,0	12	2,4
^{149}Sm	–	$1{,}28\cdot10^{-8}$	106	1096	87381
$^{150}Sm_{стаб}$ / $^{150}Sm_{stable}$	–	$4{,}1\cdot10^{-7}$	61,47	10	100
^{151}Sm	$2{,}442\cdot10^{-10}$	$6{,}36\cdot10^{-6}$	120	1092	15170
$^{152}Sm_{стаб}$ / $^{152}Sm_{stable}$	–	0,321	560	60	205,9
^{153}Sm	$4{,}139\cdot10^{-6}$	0,223	110	1682	4,073
$^{151}Eu_{стаб}$ / $^{151}Eu_{stable}$	–	$9{,}1\cdot10^{-10}$	131	1000	9200,7
^{152m1}Eu	$2{,}067\cdot10^{-5}$	$1{,}06\cdot10^{-8}$	–	–	–
^{152}Eu	$1{,}652\cdot10^{-9}$	$3{,}95\cdot10^{-9}$	120	658,7	12819
$^{153}Eu_{стаб}$ / $^{153}Eu_{stable}$	–	$5{,}8\cdot10^{-7}$	100	353,9	358
^{154}Eu	$2{,}555\cdot10^{-9}$	$4{,}5\cdot10^{-6}$	100	313,5	1663

Таблица 3
Table 3

Параметры цепочки образования ^{154}Eu в реакторе СВБР-100
Generation chain parameters of ^{154}Eu in the SVBR-100 reactor

Нуклид Nuclide	λ, $с^{-1}$ λ, s^{-1}	$\bar{y}$, %	$б_8$, барн $б_8$, barns	$б_9$, барн $б_9$, barns	$б_{10}$, барн $б_{10}$, barns
^{147}Nd	$7{,}305\cdot10^{-7}$	2,22	0,11	0,40	2,2
$^{148}Nd_{стаб}$ / $^{148}Nd_{stable}$	–	1,68	0,039	0,091	0,27
$^{150}Nd_{стаб}$ / $^{150}Nd_{stable}$	–	0,728	0,04	0,11	0,23
^{147}Pm	$8{,}376\cdot10^{-9}$	$1\cdot10^{-7}$	0,30	0,52	2,5
^{148m}Pm	$1{,}943\cdot10^{-7}$	$5{,}4\cdot10^{-8}$	1,0	3,0	18,0
^{148}Pm	$1{,}494\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-8}$	0,18	0,82	3,5
^{149}Pm	$3{,}627\cdot10^{-6}$	1,12	0,17	0,54	2,2
^{150}Pm	$7{,}183\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-4}$	–	–	–
^{151}Pm	$6{,}778\cdot10^{-6}$	0,478	0,08	0,5	2,3
^{147}Sm	–	–	0,24	0,36	2,8
^{148}Sm	–	$1{,}08\cdot10^{-10}$	0,11	0,16	0,48
^{149}Sm	–	$1{,}28\cdot10^{-8}$	0,45	1,1	4,2
$^{150}Sm_{ст}$ / $^{150}Sm_{stable}$	–	$4{,}1\cdot10^{-7}$	0,13	0,16	1,0

Окончание таблицы 3
Table 3 (Continued)

Нуклид Nuclide	λ, $с^{-1}$ λ, s^{-1}	$\bar{y}$, %	$Б_8$, барн $Б_8$, barns	$Б_9$, барн $Б_9$, barns	$Б_{10}$, барн $Б_{10}$, barns
^{151}Sm	$2{,}442\cdot10^{-10}$	$6{,}36\cdot10^{-6}$	0,55	1,4	2,7
$^{152}Sm_{ст}$ / $^{152}Sm_{stable}$	–	0,321	0,12	0,2	1,0
^{153}Sm	$4{,}139\cdot10^{-6}$	0,223	0,08	0,2	3,0
$^{151}Eu_{ст}$ / $^{151}Eu_{stable}$	–	$9{,}1\cdot10^{-10}$	0,9	1,7	8,0
$^{152m1}Eu$	$2{,}067\cdot10^{-5}$	$1{,}06\cdot10^{-8}$	–	–	–
^{152}Eu	$1{,}652\cdot10^{-9}$	$3{,}95\cdot10^{-9}$	1,1	2,4	10,0
$^{153}Eu_{ст}$ / $^{153}Eu_{stable}$	–	$5{,}8\cdot10^{-7}$	0,5	1,5	5,8
^{154}Eu	$2{,}555\cdot10^{-9}$	$4{,}5\cdot10^{-6}$	0,55	1,8	8,0

Таблица 4
Table 4

Сравнение удельного накопления $^{133,134}Cs$ и $^{153,154}Eu$ в активных зонах реакторов АСММ и реакторов коммерческих атомных станций

Comparison of specific accumulation of $^{133,134}Cs$ and $^{153,154}Eu$ in the core of SNPP reactors and reactors of commercial nuclear power plants

Реакторная установка Reactor facility	Энерговыработка, ГВт·сут/т U Power generation capacity, GW·day/t U	Удельная тепловая мощность, МВт/кг ^{235}U Specific thermal power, MW/kg ^{235}U	Масса нуклида, г/ГВт·сут Nuclide mass, g/GW·day			
			^{133}Cs	^{134}Cs	^{153}Eu	^{154}Eu
ВВЭР-1000 VVER-1000	40,5	1,0	34,1	3,87	3,29	1,22
ВВЭР-440 VVER-440	30	0,84	34,8	3,24	3,24	1,07
КЛТ-40С KLT-40C	90	0,369	34,3	3,13	3,20	0,66
РИТМ-200М RITM-200M	91	0,203	34,3	2,51	3,24	0,66
АБВ ABV	94	0,166	34,6	2,02	3,13	0,55
«Унитерм» Uniterm	75	0,078	34,8	1,39	3,08	0,48
СВБР-100 SVBR-100	69	0,185	34,9	0,917	1,25	0,245

Из табл. 4 видно, что удельное накопление нуклидов ^{133}Cs и ^{153}Eu практически не зависит от типа реактора, что можно оценить, как признак консервативности и надежности выполненных прогнозных оценок. Исключение составляет удельное накопление ^{153}Eu в реакторе на быстрых нейтронах СВБР-100, которое примерно в 2,5 раза меньше, чем для водо-водяных реакторов. Авторы статьи объясняют этот эффект различием в спектрах ППН в активных зонах реакторов, которые определяют отличия в нейтронных поперечных сечениях нуклидов.

Из данных табл. 4 следует вывод о более низкой конверсии ^{133}Cs в ^{134}Cs (3–9 %) по сравнению с конверсией ^{153}Eu в ^{154}Eu (16–21 %), что обусловлено более высокими значениями сечения поглощения нейтронов ^{153}Eu по сравнению с ^{133}Cs. Снижение накопления ^{134}Cs в РУ типа АБВ и «Унитерм» по сравнению с реакторными установками КЛТ-40С и РИТМ-200М объясняется более сильным влиянием радиоактивного распада в случае АБВ и «Унитерм», для которых характерна более продолжительная кампания реактора. Наблюдается удовлетворительное согласие данных по накоплению ^{134}Cs в реакторах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и РУ КЛТ-40С, которые имеют близкие по продолжительности кампании активных зон — 3 и 3,9 года соответственно.

Табл. 5 содержит данные об активности ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ реакторов АСММ различного типа, которая определена на основе показателей табл. 4. Для большей полноты характеризации γ-излучающих радионуклидов, накапливающихся в ОЯТ реакторов АСММ, в табл. 5 показаны данные по активности ^{137}Cs, которые вычислены по массе ^{137}Cs, приведенной в работе авторов [6].

Полученные данные по активности гамма-излучающих радионуклидов были использованы в оценках радиационной безопасности обращения с ОЯТ реакторов АСММ.

Таблица 5
Table 5

Активность гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu
в ОЯТ активных зон РУ АСММ различного типа, ПБк
Activity of gamma-emitting radionuclides ^{134}Cs, ^{137}Cs and ^{154}Eu
in SNF of cores of low-power reactors of various types, PBq

Реакторная установка Reactor facility	Энерговыработка, ГВт·сут Power generation capacity, GW·day	Радионуклид / Nuclide		
		^{134}Cs	^{137}Cs	^{154}Eu
		Период полураспада, лет / Half-life, years		
		2,065	30,1	8,6
КЛТ-40С / KLT-40C	137,5	20,56	15,74	0,908
РИТМ-200М / RITM-200M	291,7	35,0	32,37	1,915
АБВ / ABV	131,5	13,45	14,17	0,718
«Унитерм» / Uniterm	131	8,93	14,23	0,648
	181	13,9	18,14	0,965
СВБР-100 / SVBR-100	631	27,66	70,0	1,543

Демонстрация применения данных по активности гамма-излучающих радионуклидов в задачах радиационной безопасности

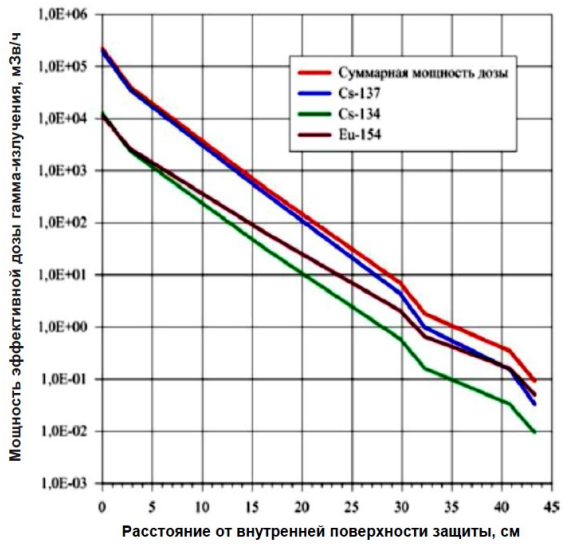


Рис. 5. Распределение мощности дозы гамма-излучения по толщине защиты контейнера ТУК-120 с ОЯТ реактора АБВ

Fig. 5. Distribution of gamma radiation dose rate over the thickness of protection of TUK-120 container with SNF of ABV reactor

С помощью математической программы DOZDAD, разработанной в Горном институте КНЦ РАН [9], было выполнено моделирование процесса прохождения гамма-излучения радионуклидов ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu через защиту металлобетонного контейнера ТУК-120, загруженного ОЯТ реакторов АСММ различного типа. Защита ТУК-120 в радиальном направлении состоит из чередующихся стальных и бетонных экранов общей толщиной 43,3 см при соотношении стали и бетона как 20:80 % объемных [10].

В качестве характеристики интенсивности источника ионизирующего излучения использованы данные по активности ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu (см. табл. 5), при этом значение активности принималось в соответствии с коэффициентом загрузки контейнера ТУК-120, определяемым по соотношению между числом отработавших тепловыделяющих сборок в контейнере и в активной зоне реактора [11] с учетом времени выдержки ОЯТ в приректорном хранилище.

На рис. 5 и 6 в качестве примера представлены некоторые результаты исследования для контейнера ТУК-120 с ОЯТ реактора типа АБВ. На рис. 5 показано распределение полной мощности дозы гамма-излучения по толщине защиты контейнера в радиальном направлении

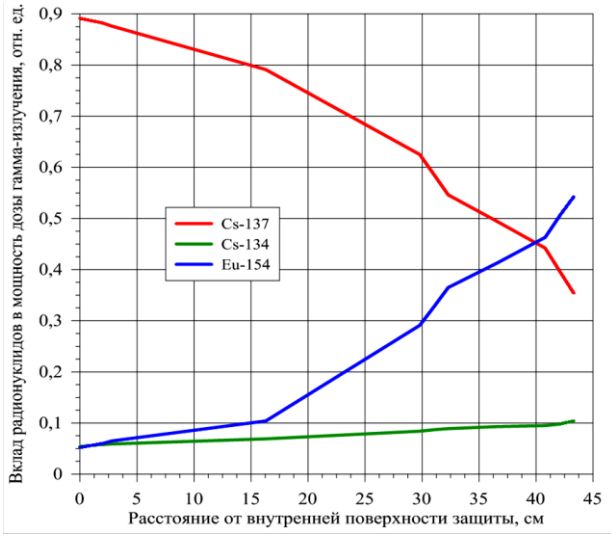


Рис. 6. Относительный вклад дозообразующих радионуклидов в мощность дозы γ-излучения по толщине защиты контейнера ТУК-120 с ОЯТ реактора АБВ

Fig. 6. Relative contribution of dose-forming radionuclides to gamma radiation dose rate over the thickness of protection of TUK-120 container with SNF of ABV reactor

на середине высоты источника, а также вклады в полную мощность дозы γ-излучения радионуклидов ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu.

Из рис. 5 следует, что ослабление мощности дозы защитой контейнера ТУК-120 характеризуется величиной примерно $2 \cdot 10^6$, а мощность эффективной дозы гамма-излучения на поверхности контейнера составляет около 0,1 мЗв/ч. В соответствии с нормативным документом [12] при таком значении мощности дозы перевозка контейнеров с ОЯТ данного типа может осуществляться на условиях обычного использования.

Распределение относительного вклада каждого из рассматриваемых радионуклидов в мощность дозы γ-излучения по толщине защиты показано на рис. 6. Данный график наглядно иллюстрирует значительный рост с толщиной защиты вклада γ-излучения ^{154}Eu — от 5 % на границе с источником до 55 % на поверхности контейнера, что свидетельствует о значимости учета гамма-излучения, испускаемого при распаде этого радионуклида. Объясняется данный факт наличием в спектре γ-квантов ^{154}Eu линий с энергией примерно 1,6 МэВ, для которой коэффициент ослабления гамма-излучения материалами защиты имеет значительно меньшие значения по сравнению с ^{137}Cs. Наличие «жестких» энергетических линий в спектре γ-квантов ^{134}Cs также определяет существенный вклад данного радионуклида в формирование мощности дозы на поверхности контейнера.

Заключение

Методами математического моделирования определены масса и активность гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu, накапливающихся в активных зонах водо-водяных (АБВ, «Унитерм», КЛТ-40С, РИТМ-200М) и жидкометаллических (СВБР-100) реакторов. Установлена сильная зависимость накопления радионуклидов от спектра нейтронов в активной зоне реактора. Так, для реакторов на быстрых нейтронах типа СВБР накопление ^{134}Cs и ^{154}Eu, нормированное на единицу энерговыработки, оказалось в 2–2,5 раза меньше, чем в реакторах на тепловых нейтронах.

Выполненные расчеты показали относительно низкую величину активности ^{154}Eu, которая составляет менее 3 % от суммарной активности гамма-излучателей (^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu) на конец кампании реактора. Однако роль ^{154}Eu в формировании мощности дозы сильно возрастает в задачах с большой кратностью ослабления ионизирующего излучения в защите.

Значимость ^{154}Eu продемонстрирована на примере изучения прохождения гамма-квантов, испускаемых при распаде ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{154}Eu, через защиту металлобетонного контейнера ТУК-120 с облученным топливом реакторов АСММ. Выполненные исследования показали, что при кратности ослабления мощности дозы γ-излучения в защите контейнера, равной примерно 10^6, относительный вклад гамма-излучения ^{154}Eu в суммарную мощность дозы возрастает с 5 % на границе с источником излучения до 55 % на поверхности контейнера. Эта особенность обусловлена наличием в γ-спектре ^{154}Eu линий с энергией γ-квантов около 1,6 МэВ, которая превышает максимальные энергии γ-спектра ^{134}Cs (примерно 1,3 МэВ) и ^{137}Cs (0,66 МэВ).

Полученные данные могут быть применены при решении задач, связанных с обеспечением радиационной безопасности при обращении с ОЯТ реакторов АСММ.

ЛИТЕРАТУРА
1. *Адамов Е. О.* Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: http://innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf (дата обращения: 06.10.2018). **2.** Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части) / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://rosatom.ru/upload/iblock/5e1/5e130b6e7fba0fb511f400defad83aca.pdf (дата обращения: 28.10.2019). **3.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России: в 2 ч. Ч. II / *Н. Н. Мельников [и др.]*. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. 209 с. **4.** *Горин Н. В., Кандиев Я. З., Чернухин Ю. И.* Обоснование ядерной и радиационной безопасности контейнера для отработавших ТВС реакторов АМБ Белоярской АЭС // Атомная энергия. 2006. Т. 100, вып. 6. С. 423–428. **5.** Об утверждении заключения государственной экологической экспертизы проекта «Реконструкция здания 5 на ФГУП «Атомфлот» под хранилище контейнерного типа для хранения (до 50 лет) неперерабатываемого отработавшего ядерного топлива атомного ледокольного флота»: приказ Федер. службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.02.2005 № 118. URL: docs.cntd.ru/document/901950066 (дата обращения: 05.10.2019). **6.** *Наумов В. А., Гусак С. А., Наумов А. В.* Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 1. С. 75–86. **7.** Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: справочник / *В. М. Колобашкин [и др.]*. М.: Энергоатомиздат, 1983. 382 с. **8.** *England T. R., Rider B. F.* Evaluation and Compilation of Fission Product Yields: Report LA-UR-94-3106, ENDF-349 / Los Alamos National Laboratory. 1994. 173 p. URL: http://t2.lanl.gov/nis/publications/endf349.pdf (accessed 29.11.2018). **9.** Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России / *Н. Н. Мельников [и др.]*. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 305 с. **10.** Ядерная и радиационная безопасность объектов хранения отработавшего ядерного топлива на Кольском полуострове / *Н. Н. Мельников [и др.]*. Апатиты: КНЦ РАН, 2011. 142 с. **11.** *Наумов В. А., Гусак С. А.* Изучение закономерностей образования источников тепла в хранилищах контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива реакторов малой мощности // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 2. (11). С. 105–115. **12.** Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-16). URL: https://minjust.consultant.ru/files/22399 (дата обращения: 19.03.2019).

Сведения об авторах

Наумов Вадим Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН
E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru
Гусак Сергей Андреевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН
E-mail: gusnat52@mail.ru

Author Affiliation

Vadim A. Naumov — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of FRC KSC RAS
E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru
Sergey A. Gusak — PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of FRC KSC RAS
E-mail: gusnat52@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Наумов, В. А. Накопление гамма-излучающих радионуклидов $^{134}C_S$ и $^{154}E_U$ в реакторах атомных станций малой мощности / *В. А. Наумов, С. А. Гусак* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 40–49.

Reference

Naumov Vadim A., Gusak Sergey A. Accumulation of Gamma-Emitting Radionuclides ^{134}Cs and ^{154}Eu in Reactors of Small Nuclear Power Plants. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 40–49. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.50-55
УДК 622.7

ОБЩИЕ КРИТЕРИИ ВЫБОРА И ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНЫХ РУД

А. В. Орлова, В. А. Таранов
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Дан обзор критериев, которые влияют на выбор технологических схем переработки медной руды. Представлена классификация медных руд в зависимости от геолого-промышленного типа горного сырья. Рассмотрены успешно применяемые и перспективные методы переработки сульфидных и окисленных медных руд. Помимо флотационного обогащения также освещены альтернативные методы и способы обогащения медной руды в связи с постепенным снижением металла разрабатываемых месторождений.

Ключевые слова:

медная руда, окисленность, флотация, выщелачивание, концентрат.

GENERAL SELECTION CRITERIA AND TYPES OF TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR THE PROCESSING OF COPPER ORES

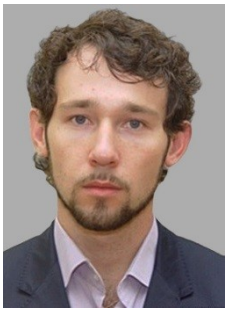
Anna V. Orlova, Vadim. A. Taranov
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstract

A review of the criteria for choosing technological scheme for copper ore beneficiation is presented. The review presents the classification of copper ores depending on the geological and industrial type of ore. Successfully applied and promising methods for processing sulfide and oxidized copper ores are considered. With the gradual deterioration in the quality of mined copper ore, other methods and technics except flotation are used to obtain a concentrate of a given quality.

Keywords:

copper ore, oxidation, flotation, leaching, concentrate.



Введение

Медные руды представляют большой интерес в промышленности. Медь применяют в машиностроении, судостроении, строительстве, в ювелирном производстве и других отраслях экономики. В связи с этим выбор технологической схемы обогащения медной руды играет важную роль в процессе получения медного сырья в виде концентрата или готового металла. Выбор схемы переработки руды, в свою очередь, зависит как от свойств самой руды, так и от развития науки и техники. Разнообразие технологических схем переработки обусловлено большим числом типов медных руд.

Целью данной статьи является обзор и классификация критериев выбора технологической схемы переработки медных руд. Критерии были выделены на базе анализа применяемых технологических схем для определенных типов руд.

Обзор литературы

Россия занимает третье место по величине сырьевой базы меди после Чили и Перу. Российская сырьевая база меди традиционно базируется на объектах сульфидного медно-никелевого, медноколчеданного и стратиформного геолого-промышленных типов [1]. Основные месторождения меди сосредоточены в Красноярском, Забайкальском и Хабаровском краях, Мурманской, Челябинской, Свердловской и Оренбургской областях, республиках Башкортостан и Тыва, Чукотском автономном округе, основные характеристики этих месторождений представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Основные медные месторождения / Major copper deposits

Месторождение (субъект РФ) Deposit (subject of the RF)	Геолого-промышленный тип Geological and industrial type	Запасы, тыс. т Reserves, thousand tons		Доля в запасах РФ, % Share in the reserves of the RF, %	Содержание меди в руде, % Copper content in the ore, %	Добыча за 2016 г., тыс. т Production for 2016, thousand tons
		$A+B+C_1$	C_2			
Октябрьское (Красноярский край) Oktyabr'skoye (Krasnodar Krai)	Сульфидный медно-никелевый Sulfide copper nickel	14091,7	5497,3	20,1	1,9	319,6
Талнахское (Красноярский край) Talnakhskoye (Krasnoyarsk Krai)		7677,5	2660,5	10,6	1,1	83
Норильск I (Красноярский край) Norilsk I (Krasnoyarsk Krai)		948,7	839,5	1,8	0,42	8
Ждановское (Мурманская обл.) Zhdanovskoe (Murmansk region)		703,8	226,3	1	0,31	12,6
Быстринское (Забайкальский край) Bystrinskoe (Zabaykalsky Krai)	Скарновый медно-магнетитовый Skarn copper magnetite	1711,2	352,2	2,1	0,78	7,6
Гайское (Оренбургская обл.) Gaiskoye (Orenburg Region)	Медно-колчеданный Copper pyrite	4288,9	478,5	4,9	1,3	69
Михеевское (Челябинская обл.) Mikheevskoe (Chelyabinsk region)	Медно-порфировый Copper-porphyry	1054,5	296,1	1,4	0,41	73,6
Томинское (Челябинская обл.) Tominskoe (Chelyabinsk region)		1206,3	1418,7	2,7	0,41	Проект Project
Юбилейное (Республика Башкортостан) Yubileynoye (Republic of Bashkortostan)	Медно-колчеданный Copper pyrite	1274,7	45,7	1,4	1,67	10,7
Подольское (Республика Башкортостан) Podol'skoye (Republic of Bashkortostan)		1701,3	16,7	1,8	2,11	Проект Project
Удоканское (Забайкальский край) Udokanskoye (Zabaykalsky Krai)	Медистые песчаники Copper sandstones	16864	3232	20,6	1,25	Проект Project
Малмыжское (Хабаровский край) Malmyzhskoe Khabarovsk Krai	Медно-порфировый Copper-porphyry	1271	3885,4	5,3	0,33	Проект Project
Песчанка (Чукотский АО) Peschanka (Chukotka AO)		2606,2	1124,5	3,8	0,83	Проект Project
Ак-Сугское (Республика Тыва) Ak-Sugskoye (Tyva Republic)		3121,2	512,1	3,7	0,67	Проект Project
Волковское (Свердловская обл.) Volkovskoe (Sverdlovsk region)	Ванадиево-железо-медный Vanadium iron copper	1594,5	153,4	1,8	0,63	4,3

По качественной характеристике медные руды разделяются следующим образом: весьма богатые — с содержанием меди более 3–5 %; богатые — содержащие более 2 % меди (для руд медно-порфировых месторождений — более 1 %); среднего качества (рядовые) — с содержанием меди более 1 % (для руд медно-порфировых месторождений — более 0,4 %); бедные — содержащие от 0,7 до 1 % (для руд медно-порфировых месторождений — менее 0,4 %) [2].

В большинстве промышленных месторождений медь присутствует в виде сульфидных соединений. Известно свыше 200 медьсодержащих минералов, из них промышленное значение имеют только 15 (табл. 2). Около 90 % мировых запасов и добычи меди приходится на четыре сульфида — халькопирит, борнит, халькозин и кубанит [2].

Таблица 2
Table 2

Главнейшие минералы меди [2]
The main minerals of copper [2]

Минерал Mineral	Химический состав (формула) Chemical composition (formula)	Содержание меди, % The copper content, %	Плотность, г/см^3 Density, g/cm^3
Халькопирит / Chalcopyrite	$CuFeS_2$	34,5	4,1–4,3
Борнит / Bornite	Cu_5FeS_4	52–65	4,9–5,2
Халькозин / Chalcosine	Cu_2S	79,8	5,5–5,8
Кубанит / Cubanite	$CuFe_2S_3$	22–24	4,0–4,2
Блеклые руды / Fahlore	$3Cu_2S(Sb, As)_2S_3$	22–53	4,4–5,1
Энаргит / Enargite	Cu_3AsS_4	48,3	4,4–4,5
Ковеллин / Covellite	CuS	66,5	4,6–4,7
Малахит / Malachite	$CuCO_3{\cdot}Cu(OH)_2$	57,4	3,9–4,1
Азурит / Azurite	$2CuCO_3{\cdot}Cu(OH)_2$	55,3	3,7–3,9
Хризоколла / Chrysocolla	$CuSiO_3{\cdot}2H_2O$	32,8–40,3	2,0–2,3
Брошантит / Broshantite	$CuSO_4{\cdot}3Cu(OH)_2$	56,2	3,8–3,9
Атакамит / Atacamite	$CuCl_2{\cdot}3Cu(OH)_2$	59,5	3,7–3,8
Куприт / Cuprite	Cu_2O	88,8	5,8–6,1
Тенорит / Tenorite	CuO	79,9	5,8–6,4
Самородная медь Native copper	Cu	88–100	8,5–8,9

По степени окисления руды медных месторождений подразделяются на сульфидные, смешанные и окисленные. Критерием для отнесения руд к тому или иному типу служит содержание меди в оксидной форме: для сульфидных руд — до 10 %, смешанных — 11–50 %, окисленных — более 50 %; для каждого месторождения эта цифра уточняется в процессе технологических исследований [2].

Выбор схемы переработки зависит от вещественного состава руды, характера вкрапленности сульфидных минералов, степени окисленности.

Применяемые и перспективные схемы переработки

Сульфидные руды в основном перерабатывают флотационным методом. Применяются коллективно-селективная и селективная схема флотации.

Для медно-порфировых руд используют коллективные схемы флотации. В некоторых случаях коллективный концентрат подвергается пропарке и обжигу с последующим выщелачиванием. Перспективным методом является извлечение молибденита из медных сульфидных концентратов обратной флотацией, другой способ предполагает предварительную электрообработку рудной пульпы для избирательной депрессии минералов путем подбора материала электродов [3].

Из халькопирит-борнит-халькозиновых руд месторождений медистых песчаников и кварцево-халькопиритовых руд жильных месторождений медьсодержащие минералы хорошо извлекаются прямой флотацией. Однако при наличии на месторождении комплексных разновидностей руд, содержащих свинец и цинк, требуются более сложные комбинированные схемы селективной и коллективно-селективной флотации [2].

Сплошные медно-колчеданные руды обычно перерабатываются по схемам селективной флотации с получением медного, цинкового и пиритного концентратов. В голове процесса флотируют сульфиды меди при депрессии сфалерита и пирита, затем из хвостов медной флотации после активации сфалерита медным купоросом флотируют цинк [2]. Пиро- и гидрометаллургическая переработка, включающая хлорирующий и сульфатизирующий обжиг, является перспективным методом переработки хвостов коллективной сульфидной флотации [3]. Первая стадия состоит из процесса хлорирующего или сульфатизирующего обжига, вторая — включает гидрометаллургическую переработку огарка. Для проведения данных методов переработки необходим высокий температурный режим. Метод переработки хвостов флотации позволяет эффективно извлекать медь из нефлотируемых минералов.

Вкрапленные медно-цинковые и полиметаллические колчеданные руды перерабатываются преимущественно по комбинированным коллективно-селективным схемам с получением коллективных концентратов и последующей их селекцией, которая осуществляется по цианидному или безцианидному способу. Цианидное разделение проводится с использованием смеси цианида с цинковым купоросом.

Халькопирит-магнетитовые (скарновые) и борнит-пирротин-магнетитовые (ванадиево-железо-медные) руды перерабатываются по комбинированным схемам, включающим флотацию минералов меди и магнитную сепарацию магнетита [2].

При переработке окисленных медных руд обычно применяют флотационный метод. Наиболее перспективным направлением переработки подобных руд является кучное выщелачивание.

Сущность выщелачивания состоит в переводе металлов из минералов в растворы, а затем в товарные осадки посредством физико-химической реакции. Данная технология исключает затраты на выпуск, доставку горной массы, рудоподготовительные процессы, поэтому требует меньше трудозатрат, энергоресурсов и технических материалов [4].

Окисленные и смешанные руды обогащаются значительно хуже, чем сульфидные, особенно те, что содержат медь в силикатной форме. Их переработка осуществляется флотационными, комбинированными и гидрометаллургическими методами. Флотация проводится после предварительной сульфидизации окисленных минералов сернистым или гидросернистым натрием. Из комбинированных методов наибольшее распространение получил метод Мостовича, который включает выщелачивание окисленной меди серной кислотой, осаждение (цементацию) меди, перешедшей в раствор, металлическим железом и флотацию цементной меди [2]. Другой вариант комбинированной схемы включает флотационное обогащение с последующим выщелачиванием концентрата флотации с последующим извлечением меди из раствора.

В настоящее время в области обогащения медных руд проводятся исследования по повышению показателей качества и извлечения концентратов.

В статье [5] рассматривается влияние высокоинтенсивного кондиционирования пульпы между стадиями основной сульфидной флотации тонких и ультратонких частиц и основной-перечистной сульфидной флотации как подготовительной операции. Применение данной операции позволяет повысить извлечение (на 17 %) и содержание меди (на 3,6 %) при низких расходах реагента. Повышение качественных показателей вызвано наличием в свежем потоке, поступающем на контактирование перед операцией основной-перечистной сульфидной флотации, извлекаемых гидрофобных минералов.

В работе [6] дана оценка современного состояния вопроса влияния крупности измельчения полиметаллической сульфидной руды на электрохимические параметры процесса подготовки пульпы перед промежуточной стадией флотации. Контроль с помощью электрохимических параметров позволяет расширить информационную базу при диагностике технологических свойств руды, а также количественно оценить значение электрохимических параметров пульпы, выявить факторы, отрицательно влияющие на технологический процесс.

Различные условия измельчения оказывают влияние на флотацию медных руд. Показатели флотации зависят также от способа и степени измельчения, которые связаны с минералогическим составом руд [7].

В работах [8–10] дана оценка современного состояния сульфидных руд и приведены особенности их подготовки для флотационного извлечения металлов.

Алгоритм априорного выбора технологии обогащения руд

Л. А. Барский и Л. М. Данильченко предложили алгоритм априорного выбора технологии обогащения руд. В основе алгоритма выбора технологии лежат данные геолого-минералогического опробования. По геологическим данным определяют генетический тип руды, ее текстурно-морфологические свойства, минеральный комплекс, после этого устанавливают существующие перспективные методы обогащения данной руды и выбирают предприятия-аналоги. Параллельно проводят анализ обогатимости входящих в комплекс минералов. На базе полученных априорных данных выбирают несколько технологических схем для экспериментальной проверки [3].

Заключение

В основу выбора технологической схемы переработки положены следующие общие критерии: характеристика геолого-промышленного типа руды; текстурно-структурные особенности руды; форма нахождения полезных компонентов; присутствие элементов-примесей; степень окисления; присутствие тонкодисперсных и легкорастворимых минералов; физические свойства минералов и руд; геологические факторы.

Ввиду того что в мировой практике обогащения используется большое количество различных химических реагентов, применяемых при извлечении меди, а также существует широкий выбор технологического оборудования, выбор схем обогащения медной руды зависит от увязки рассмотренных критериев с современными технологиями. Выполнение данной задачи эффективным образом видится в тесной комбинации технологических исследований медных руд и компьютерного моделирования технологии извлечения.

Применение такого инструмента, как моделирование технологических схем переработки медных руд в программных пакетах, позволяет подобрать по определенным критериям и свойствам руды наиболее оптимальную технологию обогащения для конкретно рассматриваемой руды, имея на выходе типоразмер основного обогатительного оборудования. В свою очередь, процессы моделирования не отменяют проведения лабораторных и полупромышленных испытаний, а лишь корректируют их с целью получения исходных данных для моделирования. Финальным и обязательным критерием выбора технологической схемы остается экономическая составляющая.

ЛИТЕРАТУРА

1. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 гг.: гос. докл. / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М., 2018. 372 с. **2.** Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды / ФГУ ГКЗ. М., 2007. 39 с. **3.** *Авдохин В. М.* Основы обогащения полезных ископаемых: учебник для вузов: в 2 т. Т. 2. Технологии обогащения полезных ископаемых. 4-е изд., стер. М.: Горная книга, 2017. 312 с. **4.** *Исмаилов Т. Т.* Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2008. 331 с. **5.** *Tabosa E., Rubio J.* Flotation of Copper Sulphides Assisted by High Intensity Conditioning (HIC) and Concentrate Recirculation // Minerals Engineering. 2010. No. 23 (15). P. 1198–1206. **6.** *Alexandrova T. N., Romanenko S., Arustamian K. M.* Electrochemistry Research of Preparation Slurry before Intermediate Flotation for Sulfide-Polimetallic Ores // 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017.Conference Processing (Albena, Bulgaria, 29.06 — 05.07.2017). 2017. Vol. 17. P. 841–848. **7.** *Long Liu H., Corin K. C., O'Connor C. T.* A Study of the Effect of Grinding Environment on the Flotation of Two Copper Sulphide Ores // Minerals Engineering. 2018. Vol. 122. **8.** *Aleksandrova T., Romanenko S., Arustamian K.* Research of Slurry Preparation before Selective Flotation for Sulphide-Polymetallic Ores // IMPC 2018, 29th International Mineral Processing Congress. 2018. P. 2071–2078. **9.** Supergene Oxide-Silicate Nickel Deposits: Mineral-Geochemical Composition and Peculiarities of Processing / *I. V. Talovina [et al.]* // Eurasian Mining. 2017. No. 1. P. 21–24. DOI: 10.17580/em.2017.01.06. **10.** *Александрова Т. Н., Ромашев А. О., Семенихин Д. Н.* Минералого-технологические аспекты и перспективные методы интенсификации обогащения сульфидной золотосодержащей руды // Металлург. 2015. № 4. С. 53–59.

Сведения об авторах
Орлова Анна Вячеславовна — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: orlova-anna2007@yandex.ru
Таранов Вадим Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: taranov.vadim@gmail.com

Author Affiliation
Orlova Anna V. — Postgraduate of the Department of Mineral Processing of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: orlova-anna2007@yandex.ru
Vadim A. Taranov — PhD (Engineering), Associate Professor of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: taranov.vadim@gmail.com

Библиографическое описание статьи
Орлова, А. В. Общие критерии выбора и виды технологических схем переработки медных руд / *А. В. Орлова, В. А. Таранов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 50–55.

Reference
Orlova Anna V., Taranov V. A. General Selection Criteria and Types of Technological Schemes for the Processing of Copper Ores. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 50–55. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.56-61
УДК 622.765-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОЛЧЕДАННЫХ ПИРРОТИНСОДЕРЖАЩИХ РУД НА ПРИМЕРЕ ПРИОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. А. Романенко, Е. К. Ушаков
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

В условиях значительной вариативности перерабатываемого сырья существенное значение имеет необходимость классификации перерабатываемых руд. К сожалению, применение классических регрессионных моделей не обеспечивает необходимого уровня достоверности из-за многофакторности и нелинейности исследуемого флотационного объекта. На примере медно-цинкового колчеданного Приорского месторождения проведен анализ геолого-минералогических особенностей посредством применения элементов нейросетевого моделирования. Согласно разработанной нейросетевой модели, выделено шесть основных кластеров. Показана значимая зависимость технологических показателей от типа перерабатываемой шихты, а также обоснована необходимость разработки высокоавтоматизированной технологии флотации, обеспечивающей более высокое извлечение металлов.

Ключевые слова:
нейронные сети, извлечение металлов, флотация, моделирование, типизация сырья.

THE STUDY OF TECHNOLOGICAL VARIABILITY OF COPPER-ZINC PYRITE PYRRHOTITE-CONTAINING ORES ON THE EXAMPLE OF THE PRIORSKOYE DEPOSIT

Sergey A. Romanenko, Egor K. Ushakov
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Annotation

In the conditions of significant variability of processed raw materials, the need for classification of processed ores is essential. Unfortunately, the use of classical regression models does not provide the necessary level of reliability, due to the multifactorial and nonlinearity of the studied flotation object. On the example of the copper-zinc-pyrite-pirrotite Priorskoye deposit, the analysis of geological and mineralogical features through the use of elements of neural network modeling is carried out. According to the developed neural network model, six main clusters has been finding. A significant dependence of technological indicators on the type of charge being processed is shown, as well as the need to develop a highly automated flotation technology that provides higher recovery of metals.

Keywords:
neural networks, metal recovery, flotation, modeling, ore classification.

В настоящей статье проанализированы геолого-минералогические особенности медно-цинкового колчеданного Приорского месторождения. Применение математических методов анализа при оценке мировой практики селективной флотации медно-цинковых и колчеданно-полиметаллических руд приведено в работах [1, 2]. С учетом сложности, многофакторности и нелинейности зависимостей исследуемой флотации медно-цинковых руд обосновывается целесообразность применения нейронных сетей Кохонена [3–6] для моделирования с целью составления технологической карты типизации перерабатываемой шихты. Согласно разработанной модели, выделено шесть основных кластеров. Показана существенная зависимость технологических показателей от типа перерабатываемой шихты и обоснована необходимость разработки высокоавтоматизированной технологии флотации, обеспечивающей более высокое извлечение металлов.

На основе имеющихся данных сформирован часовой статистический массив (включает 302 наблюдения) по работе предприятия при переработке руд Приорского месторождения за период с 10 по 27 августа 2015 г. Статистические оценки исследуемых параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Статистические оценки исследуемых параметров
Statistical estimates of the parameters under study

Код Code	Параметр Parameter	Условные обозначения Reference designation	Среднее Average	min	max	Стд. откл. Standard deviation
FM2_01MBP	Крупность пузырей в пенном слое Size of the bubbles in the foam layer	d	41	16	59	7,99
FM2_01VEL	Скорость схода пенного слоя Rate of the descent of the foam layer	V	40	21	57	7,42
	Содержание, % Content, %					
CA1_S01A01	Fe в руде Fe in ore	αFe	39,0	34,8	40,8	0,78
CA1_S01A02	Cu в руде Cu in ore	αCu	0,96	0,63	1,23	0,12
CA1_S01A03	Zn в руде Zn in ore	αZn	4,07	2,60	5,86	0,59
CA1_S03A01	Fe в концентрате Fe in the concentrate	βFe	34,8	28,1	41,6	2,07
CA1_S03A02	Cu в концентрате Cu in the concentrate	βCu	20,1	13,0	23,7	1,87
CA1_S03A03	Zn в концентрате Zn in the concentrate	βZn	3,0	1,8	5,1	0,67
CA1_S05A01	Fe в хвостах Fe in the tailings	ϑFe	39	35	44	1,06
CA1_S05A02	Cu в хвостах Cu in the tailings	ϑCu	0,17	0,12	0,27	0,02
CA1_S05A03	Zn в хвостах Zn in the tailings	ϑZn	3,56	2,57	4,95	0,53
A4M001V	Нагрузка на секцию, т/ч Loading on the section, t/h	G	352	265	374	13,85
A5C001V	Расход воздуха, $м^3$/мин Air consumption, m^3/min	W	7,8	4,4	10,3	0,97
A5C036V	Уровень пульпы Pulp level	H	–128	–499	–110	35,95
a1Cu_a5	Отношение содержания Cu в руде к содержанию Cu в хвостах Ratio of Cu content in ore to Cu content in the tailings	αCu/ϑCu	5,80	3,65	9,14	1,10
a1Zn_a5	Отношение содержания Zn в руде к содержанию Zn в хвостах Ratio of Zn content in ore to Zn content in the tailings	αZn/ϑZn	1,15	0,89	1,47	0,09

Разработка принципа технологической типизации выполняется с учетом реальной работы межцикловой флотации, которая должна обеспечивать получение «медной головки» с минимальными потерями в ней цинка. Разработана нейросетевая модель Кохонена СОКК 10:10–22:1 формата 11*2, топологическая карта которой представлена на рис. 1. Для каждого элемента решетки Кохонена (рис. 1) вычислены средние значения всех входящих переменных и выделены элементы, относящиеся к выявленным типам перерабатываемой шихты. Классификация типов руды осуществлена посредством применения факторного анализа. При факторном анализе [3, 4, 6, 7] найденных средних значений элементов решетки Кохонена получена компонентная матрица (табл. 2). Технологическая интерпретация выделенных математических компонент сделана в соответствии со значениями нагрузок исходных признаков на выделенные компоненты.

Из проекций многофакторного пространства выделена плоскость F1–F2 (рис. 2), на ней нанесены изолинии извлечения меди. Около точек проставлены номера элементов решетки Кохонена. Дополнительно на плоскостях нанесены физические векторы исходных признаков в соответствии с их нагрузками на математические векторы (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Матрица компонентных нагрузок
The matrix of component loadings

Код Code	Параметр Parameter	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4
FM2_01MBP	Крупность пузырей в пенном слое-d Size of the bubbles in the foam layer-d	–0,871	–0,034	0,071	–0,076
FM2_01VEL	Выход пенного слоя-V The output of the foam layer-V	0,222	–0,555	0,215	0,681
	Содержание Content				
CA1_S01A01	Fe в руде, % αFe Fe in ore, % αFe	0,057	–0,146	–0,923	0,036
CA1_S01A02	Cu в руде, % αCu Cu in ore, % αCu	–0,676	–0,549	–0,233	0,192
CA1_S01A03	Zn в руде, % αZn Zn in ore, % αZn	0,842	0,102	0,449	0,105
CA1_S03A01	Fe в концентрате, % βFe Fe in the concentrate, % βFe	0,953	0,059	–0,043	–0,053
CA1_S03A03	Zn в концентрате, % βZn Zn in the concentrate, % βZn	0,551	–0,109	0,777	0,016
A4M001V	Нагрузка на секцию, т/ч-G Loading on the section, t/h-G	–0,095	0,163	–0,104	0,897
a1Cu_a5	Отношение содержания Cu в руде к содержанию Cu в хвостах αCu/υCu Ratio of Cu content in ore to Cu content in the tailings αCu/υCu	–0,931	0,020	–0,249	0,026
a1Zn_a5	Отношение содержания Zn в руде к содержанию Zn в хвостах αZn/υZn Ratio of Zn content in ore to Zn content in the tailings αZn/υZn	0,103	0,845	0,081	0,104
	Общая дисперсия Total variance	4,075	1,399	1,843	1,338
	Доля общей дисперсии Share of total variance	0,407	0,140	0,184	0,134
	Технологическая интерпретация Technological interpretation	↑ Цинковый фактор ↓ Медный фактор Zinc factor Copper factor	↑ Фактор окисления ↓ Сульфидный фактор Oxidation factor Sulfide factor	↑ Сфалеритовый фактор ↓ Колчеданность Sphalerite factor Pyrite factor	↑ Нагрузка на секцию Loading on the section

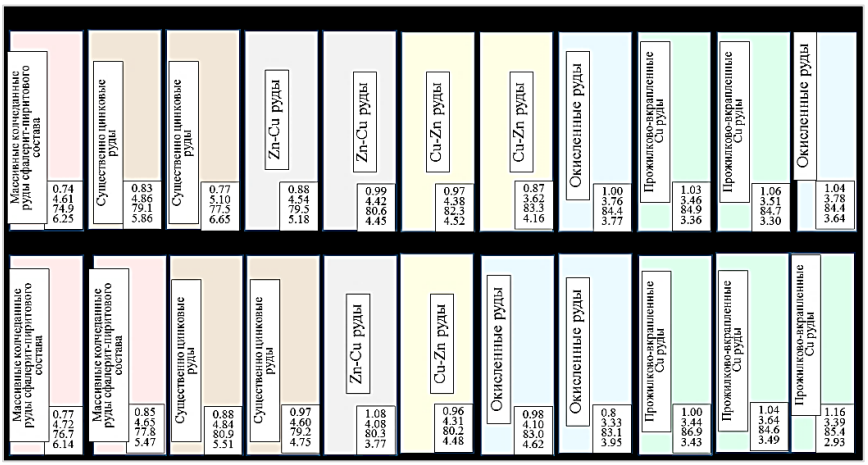


Рис. 1. Топологическая карта Кохонена

Fig. 1. Topological map of Kohonen

Двадцать два наблюдения решетки Кохонена (рис. 1) при интерпретации объединены в шесть кластеров. В направлении более высокой цинковой составляющей компоненты F1 располагаются руды с повышенным содержанием цинка в руде (по отношению к содержанию в ней меди): массивные колчеданные руды сфалерит-пиритового состава, существенно цинковые руды и цинково-медные руды (рис. 2). Согласно нанесенным изолиниям извлечения меди, в этих рудах зафиксировано пониженное извлечение металла в медном цикле, в центре многофакторного пространства наблюдается кластер медно-цинковых руд, который можно отнести к переработке рядовой шихты, для которой характерна наименьшая дисперсия всех рассматриваемых признаков в рудной массе. В направлении более высокой медной составляющей компоненты F1 располагаются руды с пониженным содержанием цинка (по отношению к содержанию в руде меди): легкообогатимые прожилково-вкрапленные руды и руды с более сильным проявлением электрохимического фактора (окисленные). Дифференциальность диагностики обеспечивает компонента F2, в которой с наибольшей нагрузкой проявляется параметр αZn/ϑZn.

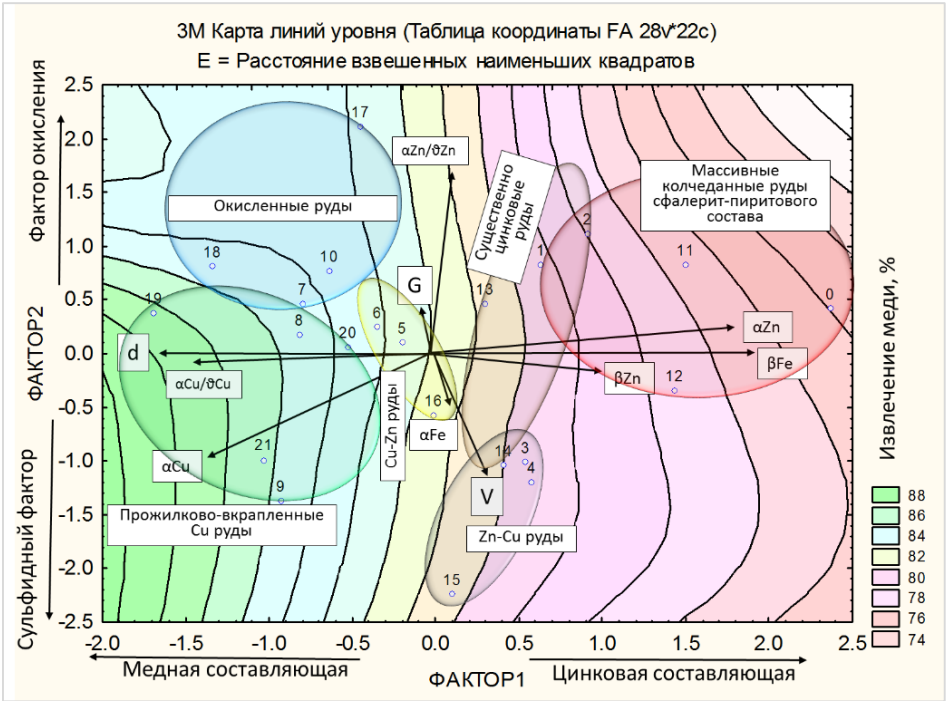


Рис. 2. Проекция многофакторного пространства на плоскость компонент F1-F2

The projection of multifactor space onto the component plane F1-F2

Для наглядности взаимосвязи соотношения содержания цинка и меди в шихте с технологическими показателями в медном цикле наблюдения элементы решетки Кохонена размещены на плоскости в координатах ε–β (традиционно общепринятое представление кривых обогатимости, рис. 3). Предельная кривая обогатимости по меди достигается при переработке прожилково-вкрапленных руд с наименьшим значением в них цинкового фактора, при его усилении наблюдается ухудшение технологических показателей.

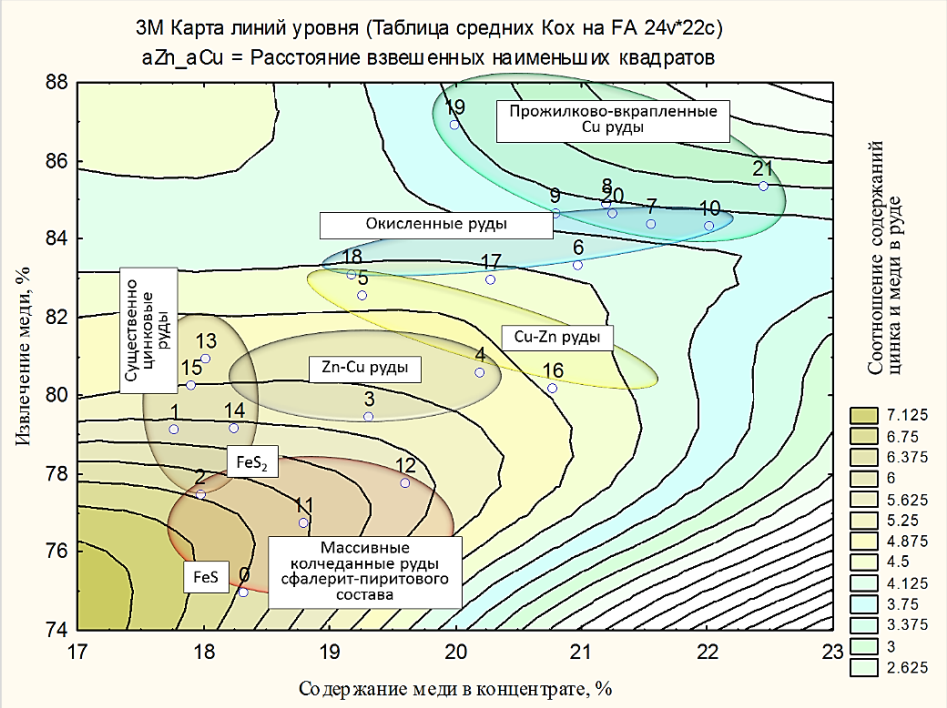


Рис. 3. Наблюдения элементов решетки Кохонена на плоскости ε–β
с нанесением на нее изолиний соотношения содержания цинка и меди в шихте

Fig. 3. Observations of elements of the Kohonen lattice on the plane “ε–β”
with the application of isolines of the ratio of zinc and copper content in the charge

Самые низкие показатели извлечения меди и качества концентрата наблюдаются при переработке массивных колчеданных руд сфалерит-пиритового состава. Достигнутые результаты при разработке технологической типизации перерабатываемой шихты во многом обусловлены совместным анализом исходных данных с помощью методологии нейросетевого моделирования и факторного анализа. Свойство сети Кохонена, обладающей ассоциативной памятью и возможностью устанавливать близость классов, наглядно демонстрирует разработанная топологическая карта (рис. 1).

Выполненным исследованием доказана сложность и нестационарность характеристик перерабатываемых руд Приорского месторождения. Обоснована эффективность применения нейронных сетей Кохонена для выявления технологической структуры рудной массы. Также применение разработанных нейросетевых моделей может быть положено в основу автоматизированной системы управления технологическим процессом [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александрова Т. Н., Арустамян К. М., Романенко С. А.* Применение математических методов анализа при оценке мировой практики селективной флотации медно-цинковых и колчеданно-полиметаллических руд // Обогащение руд. 2017. № 5 (371). С. 21–27. **2.** *Aleksandrova T., Romanenko S., Arastumian K.* Electrochemistry Research of Preparation Slurry before Intermediate Flotation for Sulphide-Polimetallic Ores // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17, No. 1.1. P. 841–848. **3.** *Кохонен Т.* Самоорганизующиеся карты: Адаптивные и интеллектуальные системы / пер. 3-го англ. изд.

В. Н. Агеева; под ред. Ю. В. Тюменцева. М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2010. 655 с. **4.** *Романенко С. А*. Эффективность применения мультисенсорных систем ионометрии и методов нейросетевого моделирования процесса флотации в лабораторных исследованиях // Обогащение руд. 2013. № 1. С. 18–22. **5.** *Хеиккинен С., Машевский Г. Н*. Алгоритмическая база для управления процессом флотации // Обогащение руд. 2005. № 6. С. 32-37. **6.** Электронный учебник по статистике // StatSoft. URL: http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm (дата обращения 20.07.2018). **7.** *Кохонен Т*. Ассоциативная память / пер. с англ. изд. В. К. Быховского. М.: Мир, 1980. 239 с.

Сведения об авторах

Романенко Сергей Александрович — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета

Ушаков Егор Константинович — аспирант кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета

Author Affiliation

Sergey A. Romanenko — Postgraduate of the Department of Mineral Processing of the Saint Petersburg Mining University

Egor K. Ushakov — Postgraduate of the Department of Geology and Mineral Exploration of the Saint Petersburg Mining University

Библиографическое описание статьи

Романенко, С. А. Исследование технологической изменчивости медно-цинковых колчеданных пирротинсодержащих руд на примере Приорского месторождения / *С. А. Романенко, Е. К. Ушаков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 56–61.

Reference

Romanenko Sergey A., Ushakov Egor K. The Study of Technological Variability of Copper-Zinc Pyrite Pyrrhotite-Containing Ores on the Example of the Priorskoye Deposit. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 56–61. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.62-68
УДК 622.7

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ*

А. О. Ромашев, Т. Д. Калмыкова
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Работа посвящена систематизации и обобщению существующих подходов к моделированию кинетики флотации и инициализации вида функции сепарации полиминерального сырья.
Для инициализации вида модели были проведены опыты флотационного обогащения выбранного сырья. Полученные данные по извлечению концентрата подвергались статистической обработке для нахождения неизвестных коэффициентов модели К. Ф. Белоглазова, уравнений интегрального метода с порядками от 0,5 до 2, также использовались специализированные компьютерные пакеты. В качестве критерия отбора наиболее оптимальной функции были выбраны коэффициент детерминации и значения стандартной ошибки. При близких значениях показателей статистические модели сравнивались по информационному критерию Акаике.

Ключевые слова:
апатит, железо, кинетика флотации, моделирование, регрессия, уравнение Белоглазова.

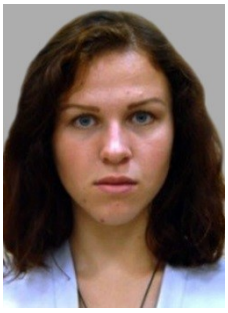
IDENTIFICATION OF KINETIC DEPENDENCIES IN ORDER TO OPTIMIZE THE FLOTATION ENRICHMENT PROCESS

Artem O. Romashev, Tatyana D. Kalmykova
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstract

Investigation of flotation kinetics is one of the important tasks in the theory and practice of modern beneficiation. At the moment, there is no universal model that satisfactorily describes the process, due to the presence of many influencing factors.
The experiments of flotation of raw materials were carried out to initialize the model type, the data on the extraction were subjected to statistical processing. The coefficient of determination was chosen as a criterion for selecting the optimal function.
According to the results of the studies, the use of an integral method of data processing has increased the accuracy of forecasting. The best results were achieved using specialized packages that perform regression processing. The modified Kelsall model showed the highest accuracy of the considered models. From a practical point of view, the most convenient method is the integral one.

Keywords:
apatite, iron ore, flotation kinetics, modeling, regression, Beloglazov equation.



Исследование кинетики флотации является одной из главных задач в теории и практике современного обогащения, которой посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ученых, предлагающих теоретические и эмпирические зависимости для определения качественно-количественных характеристик флотационного разделения. На данный момент универсальной модели, удовлетворительно описывающей протекание процесса, ввиду наличия многих влияющих факторов не существует [1].

Аналогичные споры вызывает физический смысл константы кинетики флотации k (К). На сегодняшний день нет единой теории о том, как рассчитывается константа флотации и какие параметры оказывают существенное влияние на процесс. С точки зрения метрологии и стандартизации до сих пор не предложено какого-либо прямого признака флотируемости частиц со стандартизированной технологией измерения [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00096).

Обзор литературы

Обзор материалов по тематике исследований позволил условно выделить две группы моделей: фундаментальные — основанные на физико-химических аспектах протекания флотационного акта и эмпирические — полученные для конкретных данных путем регрессионной обработки. Модели первой группы часто требуют определения одного (модель К. Ф. Белоглазова [3] и др.), двух (модели Келсолла (Kelsall), Климпела (Klimpel) [4, 5] и др.) и более (Гамма-модель [6]) дополнительных параметров процесса, что вызывает трудности при расчетах. Модели второй группы удобны для практического применения, так как не требуют проведения дополнительных замеров, но коэффициенты в данных уравнениях лишены какого-либо физического смысла [7].

Наиболее часто используемой моделью для прогноза кинетических данных является экспоненциальное уравнение первого порядка (модель Белоглазова). Из ее достоинств следует отметить легкость нахождения кинетической константы путем линеаризации полученных зависимостей, однако на практических данных почти всегда наблюдаются значительные расхождения с расчетными параметрами, что делает эту модель пригодной только для приблизительной оценки [1].

Многими исследователями были предложены более точные модели для описания кинетики флотации различных минералов. Наибольшее распространение и практическое применение нашли модели Климпела, Келсолла, а также их модификации, их сравнение представлено на рис. 1.

Рис. 1. Модели для определения кинетической зависимости

Pic. 1. Models for determining the kinetic dependence

Константа в модели Климпела, в отличие от классической модели, имеет фиксированное, или постоянное, значение для данных, не входящих в ограниченный диапазон. Келсолл предположил, что использование двух констант скорости, описывающих быстро и медленно флотируемые компоненты, дает большую достоверность для описания флотируемости, чем одна константа скорости.

Модифицированная модель Келсолла отображает нелинейную зависимость скоростей при помощи суммирования двух прямых линий. Модифицированная Гамма-функция может быть упрощенно описана как суммирующая P экспоненциальных распределений. Модель полного перемешивания отображает зависимость первого порядка извлечения компонента от времени из монодисперсного сырья с экспоненциальным распределением флотируемостей.

В математическом анализе эта задача оптимизации называется подбором кривой (curve fitting). Наиболее известными в данной области являются методы наискорейшего спуска и Ньютона, но они, к сожалению, имеют ряд существенных недостатков: метод наискорейшего спуска может очень долго сходиться в конце оптимизации, а метод Ньютона требует нахождения вторых производных, что требует большого количества вычислений при решении сложных задач.

Распространенным и удобным с точки зрения вычислений является метод наименьших квадратов (МНК), при поиске неизвестных коэффициентов он минимизирует сумму квадрата ошибки. Алгоритм Левенберга — Марквардта, который можно считать наиболее универсальным и объединяющим все достоинства вышеописанных методов, — нелинейный метод наименьших квадратов, основан на методах, приведенных в блок-схеме ниже (рис. 2). Алгоритм Левенберга — Марквардта более стабилен, чем метод Гаусса — Ньютона, и во много раз эффективнее [8].

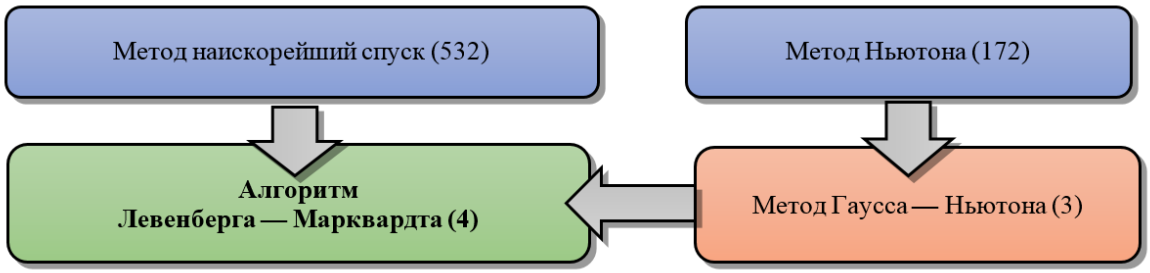


Рис. 2. Блок-схема связи методов оптимизации.
В скобках количество итераций указано для проверочной функции

Pic. 2. A block diagram of a connection of the optimization techniques.
In parentheses, the number of iterations is specified for the test function

Хотя этот алгоритм является сложным для вычислений, он может быть реализован на различных языках с использованием дополнительных библиотек (например, Pyton пакет SciPy) или на различных платформах LabVIEW, MathLab и др. Еще одно из преимуществ использования алгоритма Левенберга — Марквардта — это возможность не задавать границы варьирования, что особенно актуально при варьировании коэффициентов в большом интервале. В данной работе расчет проводился в среде MatLab, как в наиболее простой и интуитивно понятной программе для пользователя, не обладающего специальными знаниями в программировании.

Интегральный метод обработки экспериментальных данных предусматривает определение вида кинетических уравнений в форме зависимости извлечения от времени, по аналогии с кинетикой химической реакции [7] и показывает хорошие результаты сходимости.

Методология

В качестве объекта исследования было выбрано следующее сырье: сульфидная руда, апатит-нефелиновая руда. Опыты проводились на лабораторной флотомашине Laarmann. Схема опыта представлена на рис. 3.

Рис. 3. Проведение опыта

Pic. 3. Conducting an experiment

Результаты

На основе полученных данных сложно сделать вывод о форме кинетических зависимостей. Чтобы определить вид флотационной модели, были последовательно рассчитаны константы классического уравнения, с помощью компьютерных программ найдены кинетические зависимости по рассмотренным моделям и использован интегральный метод определения. Критерием отбора подходящих зависимостей был выбран коэффициент корреляции. Использование данного параметра в качестве критерия отбора допустимо ввиду наличия в рассматриваемых функциях только одного предиктора — времени флотации *t*.

Опытные и смоделированные данные представлены в таблице.

Данные, полученные при проведении опытов флотации

The data obtained in the experiment of flotation

Апатит / Apatite		Пирит / Pyrite		Арсенопирит / Arsenopyrite	
Время флотации *t*, с Flotation time *t*, sec	Извлечение ε, % Extraction ε, %	Время флотации *t*, с Flotation time *t*, sec	Извлечение ε, % Extraction ε, %	Время флотации *t*, с Flotation time *t*, sec	Извлечение ε, % Extraction ε, %
0	0	0	0	0	0
60	26,61	30	4,625	30	1,238
120	29,12	60	11,613	60	3,522
180	31,84	120	15,56	120	4,939
240	32,4	240	19,067	240	5,872
300	32,72	360	22,206	360	6,408
360	33,03	720	24,831	720	6,867
420	33,32				

Поскольку в данной работе ведется только оценка кинетики флотационного обогащения, то есть зависимости извлечения флотирующегося минерала от времени, был выбран один значимый показатель — извлечение ценного компонента в концентрат. Извлечение оценивалось по основному полезному компоненту (P_2O_5 для апатита, Fe для пирита, As для арсенопирита).

При обработке данных с помощью программы CurveExpert, полученных при флотации материалов, выбранных для проведения работы, было выявлено, что для арсенопирита и апатита одной из моделей, наиболее подходящих для описания кинетического уравнения, является модель Exponential Association 2 (рис. 4), имеющая вид классического уравнения флотации, если коэффициент *a* принять за максимальное извлечение, а коэффициент *b* считать аналогом коэффициента *k* из классического уравнения:

$$\varepsilon = a\cdot(1 - \exp^{-b\cdot x}).$$

Для арсенопирита коэффициенты $a = 6{,}67\cdot10^{-2}$, $b = 1{,}05\cdot10^{-2}$; апатита — $a = 3{,}31\cdot10^{-1}$, $b = 1{,}77\cdot10^{-2}$.

При использовании программы CurveExpert для поиска подходящей зависимости для флотации пирита из сульфидной руды (рис. 5) максимальную сходимость имеет модель Dr-Hill-Zerobackground:

$$\varepsilon = \frac{\theta\cdot x^{\eta}}{\kappa^{\eta}+x^{\eta}},$$

где $\theta = 2{,}67\cdot10^{-1}$, $\eta = 1{,}44$, $\kappa = 9{,}11\cdot10$.

При использовании разработанной на кафедре ОПИ Горного университета программы для интегрального метода определения кинетической зависимости флотации арсенопирита и апатита было выявлено, что уравнение Белоглазова обладает максимальной сходимостью с экспериментальной зависимостью (рис. 6).

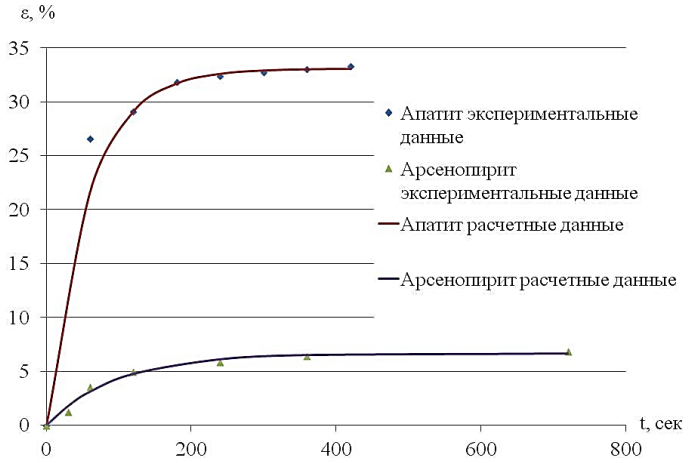


Рис. 4. Экспериментальные данные и кривые, полученные в приложении CurveExpert для классической модели Белоглазова

Pic. 4. Experimental data and curves obtained by CurveExpert for the classical Beloglazov model

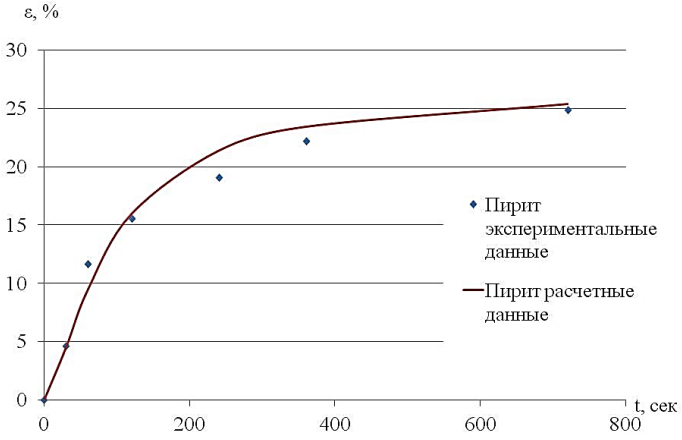


Рис. 5. Экспериментальные данные и кривые, полученные в приложении CurveExpert для пирита

Pic. 5. Experimental data and curves obtained in the CurveExpert application for pyrite

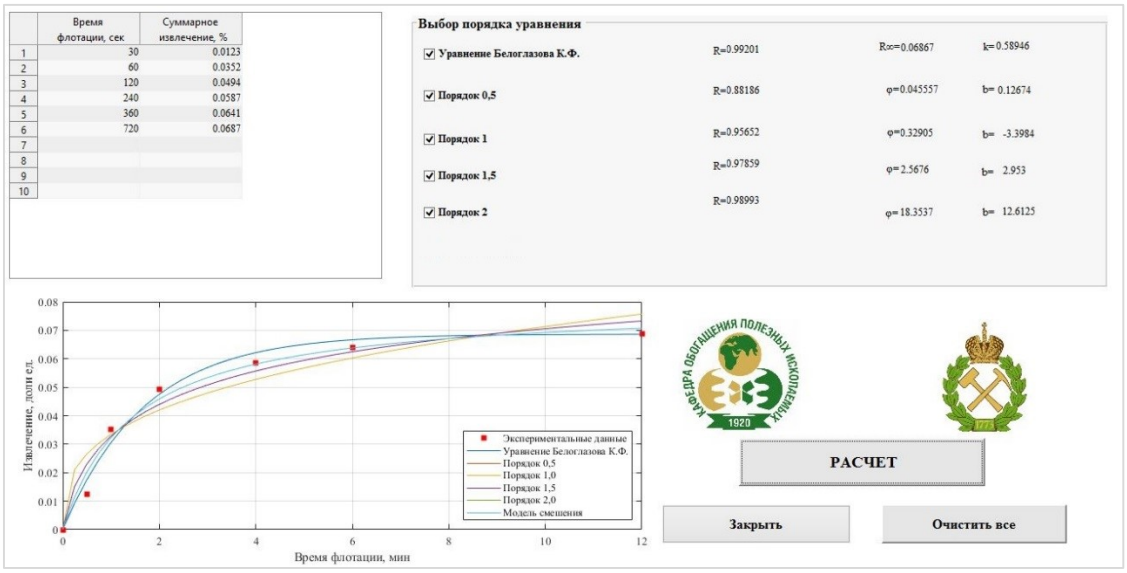


Рис. 6. Определение кинетической зависимости флотации арсенопирита из сульфидной руды

Pic. 6. Determination of the kinetic dependence of arsenopyrite flotation from sulfide ore

При использовании алгоритма Левенберга — Марквардта для интегрального метода поиска кинетической зависимости флотации апатита и арсенопирита из сульфидной руды было выявлено, что сходимость уравнения Белоглазова увеличилась и осталась максимальной среди уравнений других порядков. При определении кинетической зависимости интегральным методом для флотации пирита из сульфидной руды было обнаружено, что максимальной сходимостью обладает уравнение второго порядка. При обработке кинетики флотации пирита интегральным методом с использованием алгоритма Левенберга — Марквардта было отмечено увеличение сходимости уравнения Белоглазова с экспериментальными данными. Сходимость уравнения второго порядка и модели полного перемешивания осталась неизменной и максимальной среди всех рассмотренных уравнений.

С помощью программы для определения констант наиболее часто применяемых на практике уравнений для оценки данных флотации выбранных руд было обнаружено, что наибольшей сходимостью с практическими данными обладает модифицированная модель Келсолла (коэффициент корреляции ≥ 0,993); при использовании алгоритма Левенберга — Марквардта сходимость уравнений с практическими данными увеличилась (рис. 7).

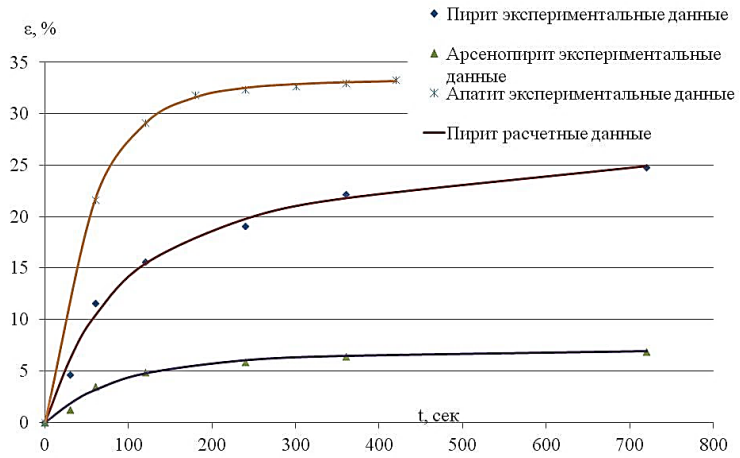


Рис. 7. Экспериментальные данные и данные,
полученные с применением модифицированной модели Келсолла

Pic. 7. Experimental data and data obtained using the modified Kelsall model

Заключение

Программа регрессионной обработки для определения уравнения кинетики позволяет получить высокоточные модели, однако их коэффициенты лишены физического смысла.

Программа для расчета уравнения Белоглазова и интегрального метода вычислений упрощает задачу определения констант в данных зависимостях. При использовании алгоритма Левенберга — Марквардта увеличивается сходимость уравнений с экспериментальной зависимостью.

С помощью программы для определения констант наиболее часто применяемых на практике уравнений было выявлено, что для всех экспериментальных зависимостей наибольшей сходимостью обладает модифицированная модель Келсолла. Алгоритм Левенберга — Марквардта увеличивает сходимость расчетных зависимостей с экспериментальными.

В дальнейшем планируется расширить базу моделей, рассматриваемых в разработанной программе, а также внедрить машинное зрение для определения параметров пены, упрощающих поиск кинетической зависимости флотационного обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рубинштейн Ю. Б.*, *Филиппов Ю. А.* Кинетика флотации. М.: Недра, 1980. 375 с. **2.** *Тихонов О. Н.* Прогнозные расчеты, проектирование и оптимизация флотационных схем // Обогащение руд. 2008. № 2. С. 10–16. **3.** *Белоглазов И. Н.* Уравнение кинетики флотационного процесса // Зап. Горн. ин-та. 2008. № 177. С. 129–132. **4.** *Kelsall D. F.* Application of Probability Assessment of Flotation Systems // Transactions, American Society of Mining

and Metallurgical Engineers. 1961. No. 70. P. 191–204. **5.** *Klimpel R. R., Mular A., Bhappu R.* Selection of Chemical Reagents for Flotation // Mineral Processing Plant Design. 2nd Edition. SME, Littleton, CO, 1980. P. 907–934. **6.** *Loveday B. K.* Analysis of Froth Flotation Kinetics // Transactions, American Society of Mining and Metallurgical Engineers. 1966. No. 75. P. 219–225. **7.** *Таранов В. А., Баранов В. Ф., Александрова Т. Н.* Обзор программ по моделированию и расчету технологических схем рудоподготовки // Обогащение руд. 2013. № 5. С. 3–7. **8.** *Brezani I., Zelenak F.* Matlab Tool for Modeling First Order Flotation Kinetics / Technical University of Kosice. URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/submissions/28703/versions/3/previews/html/flotation_modeling.html.

Сведения об авторах

Ромашев Артем Олегович — кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: romashevao@yandex.ru
Калмыкова Татьяна Дмитриевна — студентка Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: tanchika97@mail.ru

Author Affiliation

Artem O. Romashev — PhD (Engineering), Associate Professor of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: romashevao@yandex.ru
Tatyana D. Kalmykova — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: tanchika97@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Ромашев, А. О. Идентификация кинетических зависимостей с целью оптимизации процесса флотационного обогащения / *А. О. Ромашев, Т. Д. Калмыкова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 62–68.

Reference

Romashev Artem O., Kalmykova Tatyana D. Identification of Kinetic Dependencies in order to Optimize the Flotation Enrichment Process. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 62–68. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.69-74
УДК 546.284

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНОГО ШЛАКА КОМБИНАТА «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ»

О. А. Тимощик[1], Е. А. Щелокова[2], Е. В. Черноусенко[3], А. Г. Касиков[2]
[1]ФГБОУ ВО Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск
[2]ФГБУН Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты
[3]ФГБУН Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

Аннотация
Из отвального шлака комбината «Печенганикель» получены кремнеземы с высокой удельной поверхностью. Проведено флотационное обогащение остатков сернокислотного выщелачивания шлаков и наработаны первичные медно-никелевые концентраты.

Ключевые слова:
аморфный кремнезем, шлаки, флотация, удельная поверхность.

COMBINED METHOD OF COMPLEX PROCESSING OF WASTE SLAG OF THE PECHENGANIKEL PLANT

O. A. Timoshchik[1], E. A. Shchelokova[2], E.V. Chernousenko[3], A. G. Kasikov[2]
[1]Murmansk State Technical University, Murmansk
[2]I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC KSC RAS, Apatity
[3]Mining Institute of FRC KSC RAS, Apatity

Abstract
Silica with a high specific surface area was obtained from the slag dump of the Pechenganikel plant. Flotation enrichment of residues of sulfuric acid leaching of slags was carried out and primary copper-nickel concentrates were worked out.

Keyword:
amorphous silica, waste, flotation, specific surface.

Введение

В результате пирометаллургической переработки медно-никелевого сырья образуется большое количество шлаков. Несмотря на то, что шлаки часто относят к малотоксичным отходам, они являются серьезной экологической угрозой, так как содержат большое количество тяжелых металлов, которые при хранении способны к выщелачиванию и поступлению в водные объекты [1, 2]. Поэтому организация комплексной переработки шлаков взамен их складирования имеет огромное экологическое значение.

Переработка шлаков не может быть рентабельной без утилизации основных макрокомпонентов — диоксида кремния и железа, однако разделить цветные металлы, железо и кремнезем невозможно без предварительного разложения шлаков, поэтому требуется их обработка кислотами. Ранее для выщелачивания отвальных шлаков медно-никелевого производства использовали растворы соляной и серной кислот [3] с концентрированием кремнезема в остатке или с переводом его значительной части в раствор. При солянокислотном выщелачивании цветные металлы и железо переходили преимущественно в раствор, а остатки содержали в основном кремнезем и некоторое количество железа и цветных металлов. При сернокислотной переработке шлаков кремнезем получали путем его выделения из раствора, при этом удельная поверхность кремнеземов, выделенных из сернокислых растворов, характеризовалась более высокой удельной поверхностью. При сернокислотном выщелачивании цветные металлы остаются в нерастворимом остатке, что требует их отделения с получением концентратов.

Цель работы — разработка способа комплексной переработки отвального шлака комбината «Печенганикель» с получением мезопористого кремнезема с высокой удельной поверхностью и концентратов цветных металлов.

Экспериментальная часть

В работе использовали отвальные гранулированные железо-магнезиальные шлаки комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК», содержащие, мас. %: 37,5 — SiO_2, 38,5 — FeO, 7,94 — MgO и 0,4 — суммы меди, никеля и кобальта. В экспериментах использовали измельченный шлак фракции размером менее 80 мкм. Проведенные исследования химической устойчивости шлаков показали, что данный материал легко разрушается при обработке слабой серной кислотой с переходом в раствор преимущественно железа и кремния [3]. Растворение шлака проводили в 10 %-й серной кислоте, соотношение Т:Ж = 1:10, температура 20 °С, продолжительность процесса 1 ч. В результате сернокислотного выщелачивания получали растворы (pH = 2), содержащие, г/л: 36,0 — SiO_2, 37,5 — Fe. Для выделения диоксида кремния из сернокислых растворов выщелачивания шлаков их обезвоживали путем сушки на воздухе при температуре 40–50 °С и в сушильном шкафу при температуре 100–250 °С. Процесс образования диоксида кремния проходил стадию гелеобразования, а затем обезвоживания геля. В результате получали смесь аморфного кремнезема и сульфата железа (II). Для удаления сульфата железа полученный продукт промывали водой и высушивали до постоянной массы. Для очистки диоксида кремния от Fe(III) и Ca порошок дополнительно обрабатывали 20 %-м раствором соляной кислоты, соотношение Т:Ж = 1:3, температура 60 °С, продолжительность процесса 15 мин. Порошки аморфного кремнезема содержали до 93 мас. % SiO_2 и характеризовались высокой удельной поверхностью. Извлечение сульфидов цветных металлов из остатков сернокислотного выщелачивания проводили методом флотации. В качестве флотореагента применяли ксантогенат (400 г/т).

Исследования образцов методом ИК-Фурье спектроскопии проводили на спектрофотометре Nicolet 6700 FT-IP в диапазоне волновых чисел от 400 до 4000 $см^{-1}$. О дисперсности продуктов судили по результатам измерения свободной удельной поверхности $S_{уд}$ методом низкотемпературной термической десорбции азота БЭТ на лабораторном измерителе удельной поверхности и пористости FlowSorb II 2300.

Результаты и обсуждение

Экспериментально установлено, что процессы полимеризации и гелеобразования кремнезема в сульфатных растворах протекают достаточно медленно и растворы в течение нескольких суток практически не меняют своей вязкости. Для получения кремнеземов с развитой удельной поверхностью исследовали влияние pH раствора и температуры обезвоживания раствора.

Ранее нами установлено, что максимальная степень извлечения диоксида кремния из исходных растворов наблюдается при pH, равном 2 и 7 [4], при этом образцы, полученные в кислой области, характеризуются более развитой удельной поверхностью.

Вследствие различного механизма полимеризации кремнезема в кислой и нейтральной областях можно предположить, что это должно сказаться на свойствах кремнеземов. В исходный сульфатный раствор (pH = 2) постепенно добавляли раствор 1N NaOH до pH = 7. Затем растворы обезвоживали при температуре 50 °С в течение 2 сут, промывали водой и высушивали до постоянной массы. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Удельная поверхность ($S_{уд}$), размер ($d_{пор}$) и объем ($V_{пор}$) пор в зависимости от условий получения аморфного кремнезема

Specific surface area (S_s), pore size (d_{pore}) and pore volume (V_{pore}) depending on the conditions for obtaining amorphous silica

pH	$d_{пор}$, нм d_{pore}, nm	$V_{пор}$, $см^3/г$ V_{pore}, cm^3/g	$S_{уд}$, $м^2/г$ S_s, m^2/g
7	2,31	0,82	142,4
2	2,56	0,25	384,77

Как видно из табл. 1, кремнезем, полученный в нейтральной среде, обладает большим объемом пор, но при этом имеет невысокую удельную поверхность и меньший размер пор в сравнении с образцом, осажденным в нейтральной среде.

Из данных, представленных в таблице можно сделать вывод, что образцы, полученные в кислой среде, имеют развитую удельную поверхность, меньший размер частиц и объем пор, чем образцы, полученные в нейтральной среде. Это обусловливается наличием натрия в структуре кремнеземов, осажденных в нейтральной среде [5]. При промывке происходит замена Na^+ на H^+ и образуются внутриглобулярные группы, которые отсутствуют у кислых кремнеземов. Увеличение удельной поверхности у кислых кремнеземов с ростом концентрации кислоты-осадителя (табл. 2) можно объяснить увеличением дегидратирующего действия серной кислоты на мицеллы кремниевой кислоты.

Таблица 2
Table 2

Удельная поверхность ($S_{уд}$), размер ($d_{пор}$) и объем ($V_{пор}$) пор, средний размер частиц ($d_{частиц}$) в зависимости от условий получения аморфного кремнезема

Specific surface area (S_s), pore size (d_{pore}) and pore volume (V_{pore}), average particle size ($d_{particles}$) depending on the conditions for obtaining amorphous silica

11	pH	$d_{пор}$, нм d_{pore}, nm	$V_{пор}$, см^3/г V_{pore}, cm^3/g	$S_{уд}$, м^2/г S_s, m^2/g	$d_{частиц}$, нм $d_{particles}$, nm
14	7	6,02	0,41	273,3	10,64
	2	2,30	0,22	385,72	9,04
35	7	5,73	0,55	382,70	8,74
	2	2,08	0,23	441,85	7,91
98	7	2,99	0,40	532,11	5,14
	2	2,12	0,09	599,58	4,08

Изучение влияния температуры на осаждение кремнеземов проводили в течение 60 мин при pH 2 и концентрации H_2SO_4 14 % (табл. 3). Видно, что при росте температуры с 20 до 80 °С удельная поверхность кремнеземов снижается. Очевидно, это обусловлено ростом частиц за счет увеличения скорости реакции полимеризации при гидротермальной обработке [5, 6].

Таблица 3
Table 3

Влияние температуры на удельную поверхность частиц SiO_2, полученных из жидкого натриевого стекла

Effect of temperature on the specific surface of SiO_2 particles obtained from liquid sodium glass

Температура, °С Temperature, °С	20	30	40	60	80
$C_{SiO_2маточный\ р\text{-}р}$, г/л $C_{SiO_2mother\ solution}$, g/l	0,15	0,14	0,17	0,27	0,31
$S_{уд}$, м^2/г S_s, m^2/g	385,72	286,16	149,35	135,08	79,50

При исследовании влияния времени выдержки на удельную поверхность кремнеземов было установлено, что при увеличении времени выдержки удельная поверхность снижается (табл. 4). Уменьшение удельной поверхности с увеличением времени выдержки связано с тем, что происходит сближение первичных глобул в агрегатах (физическое старение) и превращение агрегатов глобул во вторичные частицы за счет конденсации поверхностных ОН-групп первичных частиц с образованием силоксановых связей и отщеплением воды (химическое старение) [7].

Из литературы [8–10] известно, что на процесс гелеобразования влияет природа кислоты, поэтому изучено влияние фосфорной, серной и соляной кислот на поверхность кремнегеля при осаждении (pH 2). Результаты представлены в табл. 5. Установлено, что при использовании H_3PO_4 полученные кремнеземы имеют наибольшую удельную поверхность и это связано с образованием мелких частиц.

Таблица 4
Table 4

Влияние продолжительности старения на удельную поверхность частиц SiO_2 из жидкого натриевого стекла (условия эксперимента: $C_{SiO_2исх}$ = 40,0 г/л; pH = 7; $C_{H_2SO_4}$ = 35 %

Effect of aging duration on specific surface of SiO_2 particles from liquid sodium glass (experimental conditions: $C_{SiO_2original}$ = 40,0 g/l; pH = 7; $C_{H_2SO_4}$ = 35 %

Продолжительность старения Aging duration	2 часа 2 hours	1 день 1 day	2 дня 2 days	3 дня 3 days
$S_{уд}$, м^2/г S_s, m^2/g	273,3	236,1	140,7	101,3

Таблица 5
Table 5

Влияние природы кислоты на удельную поверхность аморфного кремнезема, выделенного из раствора Na_2SiO_3 (C_{SiO_2} = 40 г/л; T = 20 °C, время — 1 час)

Influence of acid nature on specific surface of amorphous silica isolated from Na_2SiO_3 solution (C_{SiO_2} = 40 g/l; T = 20 °C, time — 1 hour)

Кислота Acid	Концентрация кислоты, % Acid concentration, %	$S_{уд}$, м^{2}г S_s, m^2/g
HCl	7,9	473,80
H_2SO_4	35	556,57
H_3PO_4	19,8	851,32

По результатам испытаний и с учетом доступности серной кислоты выбраны следующие условия для осаждения мезопористых кремнеземов:

- концентрация и тип осадителя — 35 % H_2SO_4;
- температура — 20 °C;
- pH осаждения — 2.

В результате получены порошки аморфного кремнезема следующего состава (табл. 6).

Таблица 6
Table 6

Состав конечного продукта, %

Composition of the final product, %

Компонент / Component					
SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	CaO
97,97	1,36	0,38	0,13	0,13	0,027

При выщелачивании шлака разбавленными растворами серной кислоты медь и большая часть никеля концентрируются в остатке в виде сульфидов (рис. 1), что приводит к первичному обогащению остатка по цветным металлам, содержащим в зависимости от условий выщелачивания 0,5–0,7 % по массе суммы никеля, меди и кобальта. На рис. 1 можно видеть частицы силикатов с преимущественно раскрытыми зернами сульфидов.

В ГОИ КНЦ РАН с целью дальнейшего концентрирования меди и никеля проведены лабораторные испытания по флотационному обогащению остатков по цветным металлам. В результате флотации был получен флотоконцентрат, содержащий 2,12 % Ni и 2,45 % Cu. Из рис. 2 видно, что концентрация сульфидов во флотоконцентрате существенно выросла, однако присутствие в остатке фрагментов исходного шлака и комбинированных частиц не позволило получить более богатый медно-никелевый концентрат. Несмотря на это, полученный материал на порядок богаче по никелю и меди в сравнении с исходным шлаком и поэтому может быть направлен на дальнейшую переработку с медно-никелевыми концентратами.

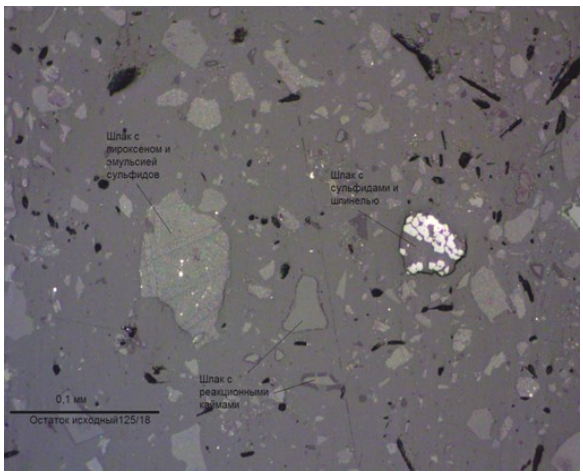


Рис. 1. Фотография аншлифа остатка сернокислотного выщелачивания шлака

Fig. 1. Photo of the anschlyph of the residue of sulfuric acid leaching of slag

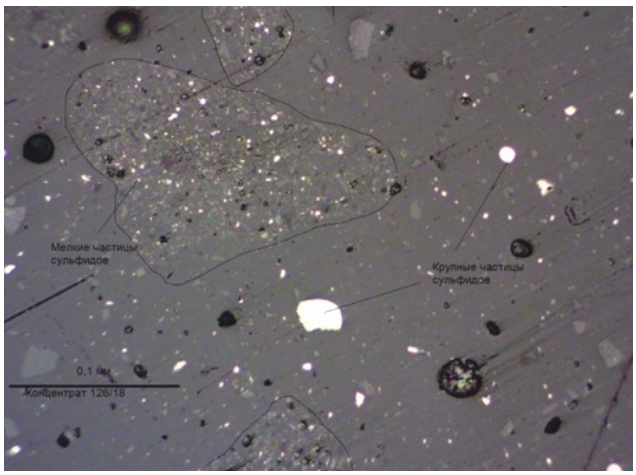


Рис. 2. Фотография аншлифа флотоконцентрата

Fig. 2. Photograph of a polished section of the flotation concentrate

Выводы

Проведенными исследованиями определено, что пористая структура SiO_2 зависит от условий его приготовления и что с увеличением концентрации серной кислоты возрастает удельная поверхность кремнеземов.

Показано также, что с ростом температуры и времени старения удельная поверхность кремнеземов уменьшается.

Кроме того, установлена также возможность эффективного флотационного обогащения остатков сернокислотного выщелачивания с получением концентратов, содержащих свыше 4,5 % суммы меди и никеля.

Таким образом, из шлаков мезопористого кремнезема по сернокислотной технологии возможно получение мезопористого кремнезема с высокой удельной поверхностью, а также дополнительно концентрата цветных металлов.

Благодарности

Авторы благодарят Ю. Н. Нерадовского за проведение минералогического анализа проб.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пашкевич М. А., Паршина М. В*. Оценка негативного воздействия основных шлакоотвалов Кольской ГМК // Горн. информ.-аналит. бюлл. 2004. № 9. С. 202–206. **2.** *Касиков А. Г., Майорова Е. А., Нерадовский Ю. Н*. Исследование структуры и химической устойчивости отвальных шлаков медно-никелевого производства // Сборник материалов III Междунар. конф. по химии и химической технологии (16–20 сентября 2013 г., Ереван). 2013. С. 56–59. **3.** *Касиков А. Г.* Проблемы и перспективы вовлечения в хозяйственный оборот отвальных продуктов медно-никелевого производства // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2013. № 1. С. 48–52. **4.** *Касиков А. Г., Щелокова Е. А., Тимощик О. А*. Получение мезопористого кремнезема с высокой удельной поверхностью из остатков солянокислотного выщелачивания металлургических шлаков // Сборник материалов IV Междунар. конф. по химии и химической технологии (23–27 сентября 2019 г., Ереван). 2019. С. 146–149. **5.** *Чукин Г. Д*. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. М.: Паладин, Принта, 2008. 172 с. **6.** *Чуйко А. А., Горлов Ю. И.* Химия поверхности

кремнезема: строение поверхности, активные центры, механизмы сорбции / отв. ред. В. М. Чертов; НАН Украины; Ин-т химии поверхности. Киев: Наук. думка, 1992. 248 с. **7.** Модифицированные кремнезема в сорбции, катализе и хроматографии / *Г. В. Лисичкин [и др.]*. М.; Химия, 1986. 248 с. **8.** *Шабанова Н. А., Попов В. В., Саркисов П. Д.* Химия и технология нанодисперсных оксидов: учеб. пособие. М.: Академкнига, 2006. 309 с. **9.** Влияние электролитов и pH на структурообразование в гидрозолях кремнезема / *Н. А. Шабанова [и др.]* // Изв. вузов. Химия и хим. технол. 1984. Т. 27, № 7. С. 830–833. **10.** Закономерности влияния минеральных кислот на кинетику гелеобразования в коллоидном кремнеземе / *Н. А. Шабанова [и др.]* // Коллоид. 1993. Т. 55, № 1. С. 145–151.

Сведения об авторах

Тимощик Ольга Александровна — Master, Мурманский государственный технический университет
E-mail: drope.dead@yandex.ru
Щелокова Елена Анатольевна — кандидат технических наук, и. о. научного сотрудника Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В.Тананаева
E-mail: e.shchelokova@mail.ru
Черноусенко Елена Владимировна — научный сотрудник Горного института ФИЦ КНЦ РАН
Касиков Александр Георгиевич — кандидат химических наук, заведующий лабораторией разработки и внедрения процессов химической технологии Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В.Тананаева
E-mail: cobaltag@yandex.ru

Author Affiliation

Olga A. Timoshchik — Master of the Murmansk State Technical University
E-mail: drope.dead@yandex.ru
Elena A. Shchelokova — PhD (Engineering), Acting Researcher of the I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC KSC RAS
E-mail: e-shchelokova@mail.ru
Elena V. Chernousenko — Researcher of the Mining Institute of FRC KSC RAS
Alexander G. Kasikov — PhD (Chemistry), Head of the Laboratory of the Development and Implementation of Chemical Technology Processes of the I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC KSC RAS
E-mail: cobaltag@yandex.ru

Библиографическое описание статьи

Тимощик, О. А. Комбинированный способ комплексной переработки отвального шлака комбината «Печенганикель» / *О. А. Тимощик, Е. А. Щелокова, Е. В. Черноусенко, А. Г. Касиков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 69–74.

Reference

Timoshchik Olga A., Shchelokova Elena A., Chernousenko Elena V., Kasikov Alexander G. Combined Method of Complex Processing of Waste Slag of the Pechenganikel Plant. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 69–74. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.75-79
УДК 622.038:622.02

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЯКУТИИ НА ОСНОВЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ МЕСТНОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ

В. И. Федоров
Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, г. Якутск

Аннотация

Представлен анализ существующих схем добычи, логистики и потребления твердого топлива в арктической части Якутии, которые образуют уникальные по сложности управления технологические цепочки. При таких схемах существуют противоречия между угольными разрезами и потребителями, в частности, качество угля не полностью соответствует требованиям покупателей. Выявленные причины сложившейся ситуации приводят к необходимости более полного изучения этих вопросов. Удовлетворение потребностей в угле в большинстве отдаленных регионов возможно как использованием существующей дорогостоящей, сложной и ненадежной схемы, так и с новой предложенной схемой, которая основана на концепции создания новых локальных малых угольных разрезов вблизи потребителей. В статье описан комплекс геотехнических критериев и граничных условий, ориентируемых на малые угольные разрезы, на основе которых можно раскрыть ресурсосберегающие, технические и технологические возможности цепи, экономически приемлемые и экологически эффективные разработки угольных месторождений. В статье показано, что соответствие и оптимизация звеньев могут быть результатом немедленной горизонтальной и вертикальной интеграции небольших открытых разрезов в цепочке поставок угля потребителям. Разработка локальных месторождений является одним из направлений повышения энергетической безопасности труднодоступных северных районов Якутии и поддержки их экономического и социального развития.

Ключевые слова:

малый угольный разрез, труднодоступные регионы, добыча полезных ископаемых, логистика, локальные угольные месторождения, геотехнология.

ENERGY SECURITY PROBLEMS IN THE ARCTIC AREAS OF YAKUTIA BASED ON POTENTIAL DEVELOPMENT OF THE LOCAL RAW MATERIAL BASE

V. I. Fedorov
N. V. Chersky Institute of Mining of the North of the SB of RAS, Yakutsk

Abstract

The analysis of the existing schemes of production, logistics and consumption of solid fuel in the Arctic part of Yakutia, which form unique technological complexity chains, is presented. With such schemes, there are contradictions between coal mines and consumers, in particular, the quality of coal does not fully meet the requirements of buyers. The identified reasons for this situation lead to the need for a more complete study of these issues. Solving the coal needs in most remote regions is possible both for the existing expensive, complex and unreliable scheme, and using the new proposed one, which is based on the concept of creating new local small coal mines near consumers. The article describes a set of geotechnical criteria and boundary conditions oriented towards small coal mines, on the basis of which it is possible to reveal resource-saving, technical and technological capabilities of the chain, economically acceptable and environmentally efficient development of coal deposits. The article shows that link matching and optimization can be the result of immediate horizontal and vertical integration of small open coal mines in the coal supply chain to consumers. The development of local deposits is one of the ways to increase the energy security in the remote Northern regions of Yakutia and support their economic and social development

Keywords:

small coal mine, hard-to-reach regions, mining, logistics, local coal deposits, geotechnology.

Введение

Уголь остается одним из основных видов топливо-энергетических ресурсов, используемых в жилищно-коммунальном хозяйстве труднодоступных арктических районов Якутии. На производство тепловой энергии в муниципальных котельных при слоевом способе сжигания применяется завозимый с других районов каменный уголь. Данная технология сжигания топлива может обеспечить полноту сгорания, эффективность и экологическую безопасность только при использовании угля, отвечающего предъявляемым к установленному оборудованию требованиям. Проведенные ранее анализы показали, что за последние пять лет работы в цепи поставок твердого топлива (рис. 1) произошло несколько крупных чрезвычайных ситуаций и сбоев отопительного сезона, при этом происходят ежегодные качественные и количественные потери угля и тепловой энергии. Добываемое топливо на угольных разрезах Якутии претерпевает ряд негативных качественных трансформаций при доставке его навалом в отдаленные энергоизолированные районы.

Рис. 1. Основные маршруты доставки угля в арктические районы Якутии

Fig. 1. The main routes for the delivery of coal to the Arctic regions of Yakutia

Исследование

Чтобы удовлетворить потребности региона в угле, в центральной и полярной Якутии ведется его добыча на 6 разрезах. Мощность каждого из них находится в пределах 25–160 тыс. т в год (рис. 2), она ограничена общей минимальной емкостью локального рынка, оцениваемой в 0,9–1,2 млн т в год. Разрезы характеризуются ярко выраженной сезонностью потребления (зима), частым отсутствием круглогодичного транспортного обеспечения. Сроки доставки топлива доходят до 2,0–2,5 лет в полярные районы, стоимость угля на месте потребления до 4–5 раз выше, чем на месте его добычи. Предприятия сильно зависят от государственного заказа на уголь, который хотя и способствует преодолению кризиса неплатежей и повышению загруженности предприятий, но не дает необходимых финансовых ресурсов для их нормального функционирования.

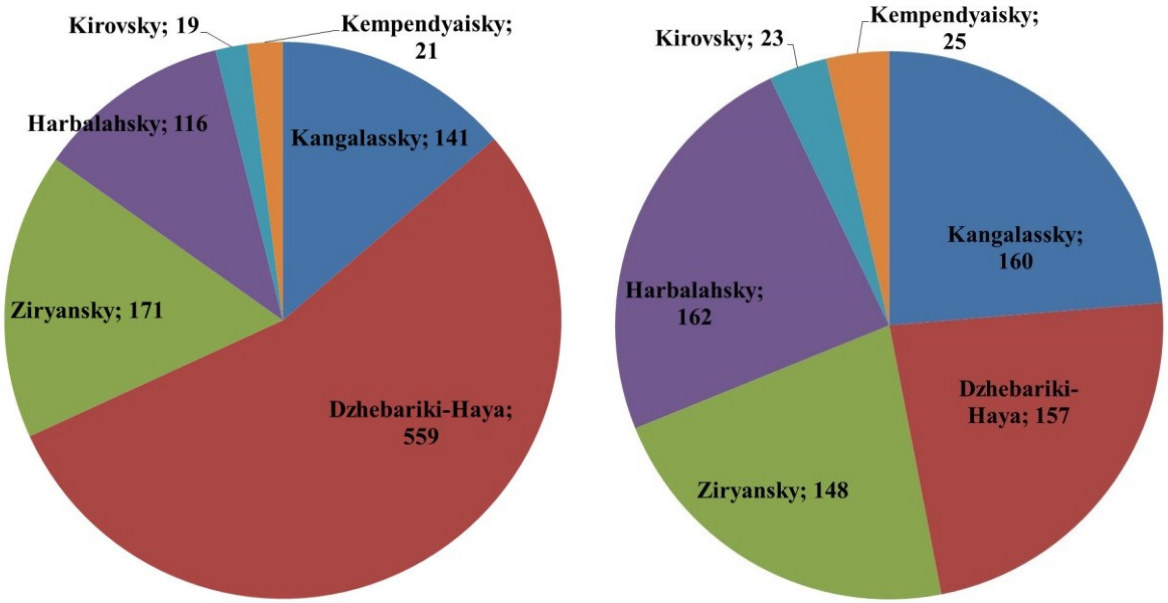


Рис. 2. Добыча угля в центральных и северных районах Якутии, тыс. т

Fig. 2. Coal mining in the Central and Northern regions of Yakutia, thousand tons

Возможности привлечь дополнительные инвестиции для малых предприятий в силу ряда причин ограничены. Вопросам повышения качества угля из-за ограниченного числа поставщиков уделяется мало внимания. Действующими в интересах добывающих предприятий нормативными документами предусмотрена поставка именно необогащенного угля. Для отгружаемых углей установлены только предельные значения размеров куска (0–300 мм), зольности A^d, % и общей влаги в рабочем состоянии топлива W_t^r, %. В требованиях практически не учитываются технологии сжигания топлива в котельных предприятий и бытовых печах. Максимальные сроки хранения угля после добычи определены в 6 (бурый) и 12 месяцев (каменный), что при сложной логистике значительно меньше фактических значений. Выходной контроль качества топлива часто осуществляется формально, входной контроль у потребителей, как правило, отсутствует. В гранулометрическом составе сжигаемого угля после многочисленных перевалок преобладают мелкие классы. Показатели зольности и теплоты сгорания отгружаемого угля варьируют от партии к партии. Фактическая средняя зольность угля может превышать предельно допустимый уровень. Не контролируется и ряд показателей качества (гранулометрический состав, теплота сгорания топлива на месте потребления; однородность по разным показателям во времени), важных для оценки эффективности сжигания углей в слоевых топках, особенно с ручным обслуживанием.

Анализ научно-технической литературы показывает, что относительно высокие теплотехнические показатели достигаются при сжигании угля с крупностью кусков, превышающих размер ячеек колосниковой решетки. При одной и той же потребности в тепле расход рядового и сортового угля на его получение сильно различается: 1 т условного топлива может быть замещена 4,34 и 2,65 т угля соответственно, то есть сортового топлива для получения одного и того же количества тепла требуется в количественном выражении в 1,6–1,7 раза меньше [1].

В результате выполненных на Алтае исследований установлено, что при разных уровнях нагрузки удельные расходы угля в котлах со слоевым типом сжигания увеличиваются на величину от 0,2 до 0,9 % пропорционально увеличению на 1 % содержания в угле мелких классов (менее 10 мм) [2]. Это имеет отношение и к новому применяемому оборудованию, и к эксплуатируемому длительное время [2]. Утилизация рядового угля с высоким содержанием мелких фракций вместо сортового ведет к снижению КПД котлов с 64–73 до 23–35 %, а перерасход угля составляет 50–100 %. Увеличение объемов добычи обходится в 3–10 раз дороже, чем повышение эффективности использования классифицированных, облагороженных углей [3].

Методика учета факторов

При разработке проектов и создании в труднодоступных районах Якутии микроразрезов по добыче угля целесообразно использовать синтезированные в единое целое основные технические, технологические и организационные подходы и решения. Часть из них апробирована горными предприятиями, работающими на Крайнем Севере. Представленный несколькими блоками комплекс ориентирует малые предприятия на ресурсосберегающее, экономически и экологически приемлемое освоение новых месторождений или их участков.

Блок 1. Выбор месторождения/участка для добычи угля открытым способом. Расстояние до потребителей или транспортных коммуникаций $L \rightarrow \min$, км. Мощность вскрышных работ — 0–20 м; коэффициент вскрыши $K_в \sim 1–1{,}5$ м^3/т, с повышением до экономически приемлемого уровня. Геометрия участка — простая. Объем запасов для первоочередной отработки — 500–700 тыс. т и более. Глубина залегания $H \rightarrow \min$, м. Требуется доразведка и переоценка запасов участка.

Блок 2. Горные работы. Мощность разреза P — 20–100 тыс. т/год. Срок отработки — не менее 7–10 лет. Объем горно-капитальных работ — минимальный. Проектирование — унифицированные проекты с типовыми решениями. Параметры систем разработки — из типовых схем с учетом работы аналогичных разрезов. Рыхление пород — взрывное, угля — преимущественно механическое.

Блок 3. Оборудование. Дизельные, самоходные и максимально унифицированные гидравлические экскаваторы, погрузчики, бульдозеры, автосамосвалы. Электроснабжение — автономные дизельные электростанции. Техническое обслуживание, текущий и средний ремонт — собственные силы с плановая заменой крупными узлами.

Блок 4. Организация работ и управление. Интеграция участников цепочек поставок — вертикальная/горизонтальная, в т. ч. в составе локальных топливно-энергетических комплексов. Основной персонал — вахта. Привлечение местного населения — частичное, исходя из его квалификации. Система налогообложения — упрощенная с льготами на период строительства и выхода на проектную мощность. Геолого-маркшейдерское обеспечение, буровзрывные работы — аутсорсинг. Финансовое управление и учет — аутсорсинг или работа в составе вертикально-интегрированной компании. Режим работы — максимальное использование теплого времени года (II–III квартал).

Обсуждение результатов

Результатом реализации разработанных подходов может стать формирование новых цепочек поставок угля, например, на базе Краснореченского месторождения в бассейне р. Индигирка (рис. 3). Реализация проекта позволит исключить из цепочки поставки морского транспорта и несколько трудоемких перевалок угля, а также приведет к снижению потерь угля по количеству и качеству, а также и стоимости местного угля на месте потребления до 2–3 раз по сравнению с привозным. Значительно уменьшатся расстояния транспортирования (до 1500 км) и сроки доставки угля (с 2–2,5 лет до нескольких месяцев).

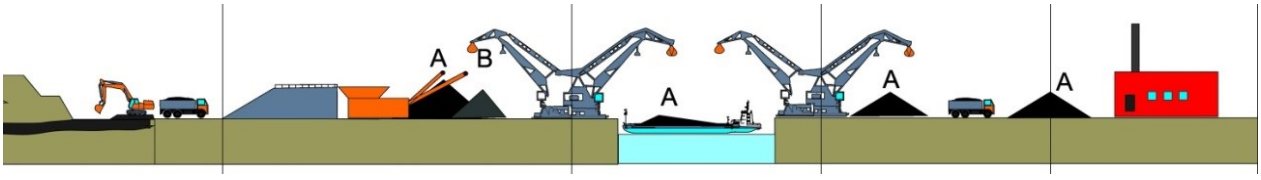


Рис. 3 Цепочка поставок угля с сортировочным комплексом и без использования морского транспорта

Fig. 3 Coal supply chain with sorting complex and without the use of sea transport

Сложные цепочки добычи и транспортировки угля, выработки из него тепловой и электрической энергии в труднодоступных районах Якутии требуют совершенствования. Корректировка применяемых для оценки эффективности цепочек поставок критериев для согласования интересов всех сторон позволяет рассматривать их как единые системы

управления, в том числе качеством угля, где разрезы выступают базовыми элементами. Для повышения потребительских свойств угля предлагается организовать на добывающих предприятиях его дополнительную подготовку к длительной транспортировке и сжиганию. Мероприятия включают операции: картирование запасов по сортам; усреднение качества угля в потоках и на складах; сортировка топлива по классам крупности; использование мягкой тары для перевозки в самые отдаленные районы.

Выводы

Создание новых микроразрезов на месторождениях, находящихся максимально близко от мест потребления угля, необходимо осуществлять на основе синтезированных принципов и подходов, ориентирующих предприятия на ресурсосберегающее, технологически, экономически и экологически эффективное освоение недр, а цепочки поставок угля должны быть направлены на повышение энергетической безопасности труднодоступных районов Якутии. Для предприятий, которые добывают уголь в регионе, получение прибыли может не являться основной целью, необходимость их существования может иметь в большей степени социальное, чем коммерческое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маутина А. А., Шилкина О. О*. Особенности использования углей Канско-Ачинского бассейна // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2002. № 1–2. С. 62–67. **2.** *Переясловский И. В., Степаненко С. А., Осокин С. Е*. Выбор энергоэффективного угольного топлива. URL: http://www.energosovet.ru/stat828.html (дата обращения: 12.07.2016). **3.** *Жигуленкова А. И., Алексеева С. Н., Кекух Т. Ю*. Рынки, цены и эффективность использования сортовых углей // ГИАБ. 2000. № 2.

Сведения об авторе

Федоров Владислав Игоревич — младший научный сотрудник Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН
E-mail: fonariwe@gmail.com

Author Affiliation

Vladislav I. Fedorov — Junior Researcher of the N. V. Chersky Institute of Mining of the North ot the SB of RAS
E-mail: fonariwe@gmail.com

Библиографическое описание статьи

Федоров, В. И. Проблемы обеспечения энергобезопасности арктических районов Якутии на основе потенциального освоения местной сырьевой базы / *В. И. Федоров* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 75–79.

Reference

Fedorov Vladislav I. Energy Security Problems in the Arctic Areas of Yakutia Based on Potential Development of the Local Raw Material Base. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 75–79. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.80-91
УДК 550.41

ОЦЕНКА РОЛИ СУЛЬФАТНОЙ СЕРЫ В ТРАНСПОРТЕ ЛАНТАНОИДОВ ОКИСЛЕННЫМИ ФЛЮИДАМИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ (ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)*

Г. П. Широносова[1], И. Р. Прокопьев[1,2]
[1]ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
[2]ФГАОУ ВО Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Аннотация

Проведена оценка роли сульфатной серы в транспорте и процессе рудоотложения РЗЭ в слабокислых, близнейтральных и слабощелочных условиях при одновременном разбавлении и охлаждении гидротермальных флюидов. Это стало возможным благодаря появлению новых экспериментальных данных по устойчивости сульфатных комплексов лантаноидов. Задача решается с помощью метода термодинамического моделирования воздействия на ассоциацию монацита с кальцитом изначально богатого сульфатной серой и хлоридом гидротермального флюида. Установлено, что в слабокислых и близнейтральных флюидах для всех лантаноидов ведущими оказываются моно- и бисульфатные комплексы. Таким образом, показано, что обогащенные сульфатной серой слабокислые и близнейтральные гидротермальные флюиды способствуют выносу лантаноидов в виде их сульфатных комплексов, несмотря на превалирующее содержание в растворах NaCl. В слабощелочных условиях транспорт лантаноидов осуществляется их гидроксокомплексами, а сульфатные комплексы отходят на второй план.

Ключевые слова:
лантаноиды, гидроксо-, фторо-, хлоро-, сульфатные комплексы, богатый сульфатной серой и NaCl флюид, термодинамическое моделирование.

ESTIMATION OF THE ROLE OF SULFATE SULFUR IN THE TRANSPORT OF LANTHANIDES BY OXIDIZED FLUIDS IN THE FORMATION OF DEPOSITS WITH RARE EARTH MINERALIZATION (THERMODYNAMIC MODELING)

Galina P. Shironosova[1], Ilya R. Prokopyev[1,2]
[1]V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB of RAS, Novosibirsk
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract

The role of sulfate sulfur in the transport and deposition of REE under weakly acidic, near-neutral and weakly alkaline conditions with simultaneous dilution and cooling of hydrothermal fluids is evaluated. This became possible due to the emergence of new experimental data on the stability of lanthanide sulfate complexes. The problem is solved using the method of thermodynamic modeling of the effect on the association of monazite with calcite, which is initially rich in sulfate sulfur and chloride of hydrothermal fluid. It has been established that in weakly acidic and near-neutral fluids for all lanthanides, bisulfate and monosulfate complexes are leading. Thus, it was shown that weakly acidic and near-neutral hydrothermal fluids enriched with sulfate sulfur promote the removal of lanthanides in the form of their sulfate complexes despite the prevailing NaCl content in solutions. Under slightly alkaline conditions, the transport of lanthanides is carried out by their hydroxocomplexes, and sulfate complexes fade into the background.

Keywords:
lanthanides, hydroxy-, fluoro-, chloro-, sulfate complexes, sulfate-chloride-rich fluid, thermodynamic modeling.

* Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (0330-2016-0002). Численные эксперименты в щелочных системах проведены за счет средств гранта Президента РФ МК-1113.2019.5.

Введение

Возрастающий объем использования редкоземельных элементов (РЗЭ) в современных технологиях требует выработать понимание их поведения в природных гидротермальных системах. Ряд авторов указывает на высокое содержание серы и фтора в рудообразующих флюидах при формировании гидротермальных месторождений РЗЭ и возможный контроль их миграции сульфатными комплексами [1–4]. В частности, З. Ченг с соавторами приводят высокие значения концентрации S (6,3–8,4 вес. %) и F (0,2–1,3 вес. %) на карбонатитовом месторождении Бачу (Китай) [5]. На активное участие сульфатной серы в процессе формирования редкоземельного оруденения указывает наличие сульфатных дочерних фаз (ангидрита, тенардита, глауберита, барита, целестина) в кристалло-флюидных включениях карбонатитовых комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса: Карасуг и Улатай-Чоз в Центральной Туве [6, 7], Западно-Забайкальские карбонатиты [8] и Южно-Монгольский щелочной комплекс Мушугай-Худук [9].

К настоящему времени широко известно, что на ранних высокотемпературных стадиях рудообразования гидротермальные флюиды настолько высоко концентрированные, что иногда приближаются к рассолам, с постепенным уменьшением содержания в них солей при понижении T-P-параметров рудообразующей среды [6, 7, 9–11]. Так, в работе [10] приводятся значения солености флюидов на ранней стадии до 33–50 вес. % NaCl эквивалента, с понижением до 29 вес. % NaCl эквивалента при образовании флюорита на более поздней стадии. В статье [9] установлено, что соленость рудообразующего флюида менялась от 32–48 вес. % NaCl эквивалента при 300–380 °C, до 15–30 вес. % NaCl эквивалента при 250–300 °C и 1–15 вес. % NaCl эквивалента при 150–250 °C. При построении модели охлаждающегося с одновременным разбавлением гидротермального флюида было принято, что концентрация хлорида натрия уменьшается от 4 до 1 m (моль/1 кг H_2O), т. е. от 15,9 до 5,3 вес. %, $NaHSO_4$ от 2 до 0,4 m, т. е. от 16,2 до 4,3 вес. % и HF от 0,1 до 0,02 m при охлаждении флюида от 500 до 100 °C и уменьшении давления от 2000 до 125 бар. Таким образом, суммарная концентрация растворов менялась примерно от 32 до 9,6 вес. %. Для поддержания относительного постоянства заданного pH модельных растворов в них вводилось дополнительное количество щелочи (KOH). В состав системы вводилось 0,1 моль $CaCO_3$ и $5{,}1\cdot10^{-3}$ моль модельного монацита, содержащего РЗЭ в соотношении (моли соответствующих фосфатов): La — $1{,}3\cdot10^{-3}$; Ce — $2{,}4\cdot10^{-3}$; Pr — $2{,}7\cdot10^{-4}$; Nd — $8{,}3\cdot10^{-4}$; Sm — $1{,}17\cdot10^{-4}$; Eu — $4{,}7\cdot10^{-6}$; Gd — $9\cdot10^{-5}$; Tb — $9{,}17\cdot10^{-6}$; Dy — $3{,}8\cdot10^{-5}$; Ho — $5{,}2\cdot10^{-8}$; Er — $9{,}5\cdot10^{-6}$; Yb — $2{,}7\cdot10^{-6}$; Lu — $2\cdot10^{-7}$; Y — $2{,}4\cdot10^{-4}$. РЗЭ-содержащие минералы в расчетах рассматриваются как идеальные твердые растворы: монацит ($LnPO_4$, где Ln — La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd); РЗЭ-флюорит (CaF_2 — $(Ln, Y)F_3$) и РЗЭ-фторапатит ($Ca_5(PO_4)_3F$ — $(Ln, Y)_3(PO_4)_3$), где Ln весь ряд от La до Lu, а также ксенотим (Y, Ln) PO_4, где Ln — Tb, Dy, Er, Yb, Lu.

Термодинамическое моделирование воздействия гидротермальных флюидов на монацит и кальцит выполнялось с использованием программного комплекса HCh [12]. Для определения состояния равновесия в алгоритме программы используется метод определения минимума свободной энергии Гиббса системы (программа GIBBS) в сочетании с термодинамической базой UNITHERM. В данной работе база UNITHERM дополнена экспериментальными результатами для хлоридных, фторидных, сульфатных комплексов лантаноидов и фосфатных минералов РЗЭ [13–16]. Данные для кальцита, флюорита, фторапатита, тенардита и ангидрита заимствованы из работы [17], для базовых ионов и комплексных частиц макросистемы — из термодинамической базы данных SUPCRT [18], а для HCl взяты из публикации [19].

Результаты и их обсуждение

Соотношение равновесных твердых фаз после воздействия на ассоциацию монацит + кальцит **слабокислого** (с pH 4,4–4,2) фторидно-сульфатно-хлоридного охлаждающегося и разбавляющегося флюида, параметры которого отображены в подписях к оси абсцисс, приведено на рис. 1. Из минералов макросистемы в высокотемпературной области (500–400 °C) образуется тенардит (Na_2SO_4), и во всем исследованном интервале параметров флюида образуется ангидрит ($CaSO_4$), их количества показаны сплошными линиями на основной — левой оси ординат.

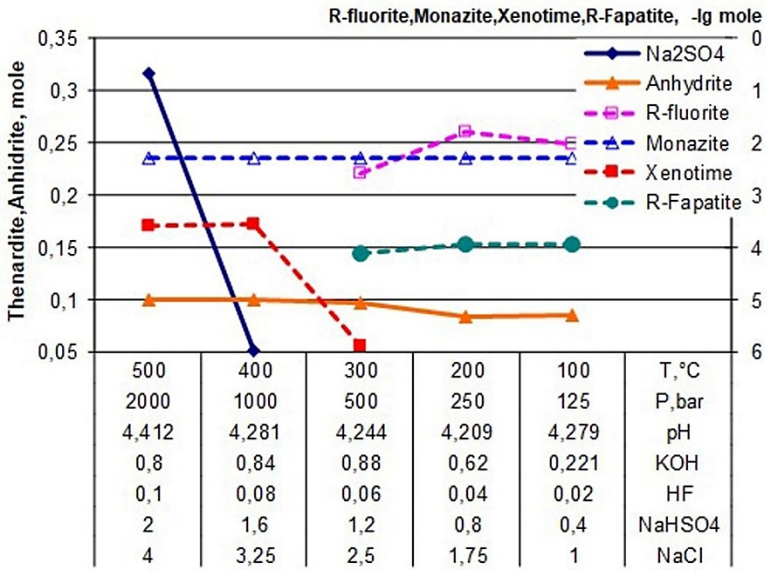


Рис. 1. Воздействие на монацит + кальцит слабокислого фторидно-сульфатно-хлоридного охлаждающегося и разбавляющегося флюида (концентрации компонентов раствора на шкале абсцисс приведены в моляльностях — моль/1 кг H_2O)

Fig. 1. Impact of weakly acidic fluoride-sulphate-chloride cooling and diluting fluid on monazite + calcite (The concentrations of the components of the solution on the abscissa scale are given in molality — mole/1 kg H_2O)

Дополнительная (правая) ось ординат показывает количества минералов микроподсистемы — РЗЭ-содержащих минералов. В интервале температур 500–300 °С образуется ксенотим ($[Y,Ln]PO_4$) в количествах, уменьшающихся при понижении температуры (от $2{,}5\cdot10^{-4}$ до $1{,}3\cdot10^{-6}$ моль соответственно), в области пониженных температур (300–100 °С) образуются РЗЭ-флюорит $(1–2{,}5)\cdot10^{-3}$ моль и РЗЭ-фторапатит около 10^{-4} моля. Исходный монацит сохраняется во всем интервале параметров флюида, близких к начальному содержанию.

На рис. 2 дано сравнение исходных концентраций макрокомпонентов с их конечными содержаниями в слабокислом флюиде, прореагировавшем с монацитом и кальцитом в условиях его охлаждения и одновременного разбавления. Образование значительного количества тенардита при 500 °С (около 3,2 моля) привело к заметному уменьшению сульфатной серы в равновесном флюиде, в то время как количество образующегося ангидрита (на уровне 0,1 моль) мало сказывается на конечном ее содержании. Равновесные концентрации хлорида полностью совпадают с его исходной концентрацией во флюиде, а концентрации фторида незначительно понижаются в области образования РЗЭ-флюорита.

Сравнительный график исходных и конечных концентраций микрокомпонентов в слабокислом флюиде, прореагировавшем с монацитом в условиях его охлаждения и одновременного разбавления, приведен на рис. 3. Наиболее высокие содержания лантаноидов наблюдаются при 400 °С (за исключением иттербия), при 500 °С они в той или иной мере уступают концентрациям при 400°С, что, очевидно, связано с заметным уменьшением равновесной концентрации серы при 500 °С вследствие значительного количества образующегося здесь тенардита. В интервале температур 300–100 °С у лантана, церия и празеодима наблюдается рост их концентраций при понижении температуры в равновесном флюиде, тогда как у неодима, самария и европия обнаруживается обратная тенденция. При этом (несмотря на наличие европиевого минимума на кривой исходных концентраций) в равновесных флюидах фиксируется европиевый максимум. У гадолиния, напротив, обнаруживается минимум, причем концентрации Gd при всех трех температурах оказываются близкими и несколько большими, чем при 500 °С. Для тяжелых лантаноидов от тербия до лютеция наблюдается хаотичная зависимость равновесных

концентраций при понижении температуры от 300 к 100 °С, при этом особняком стоит иттербий из-за повышенной растворимости его фторида и ограниченного вхождения Yb в образующийся РЗЭ-флюорит [20]. Такая картина зависимости концентраций лантаноидов от температуры в равновесных флюидах обусловлена не только новообразованием равновесных твердых фаз, но и комплексообразованием редкоземельных элементов в исследуемых условиях.

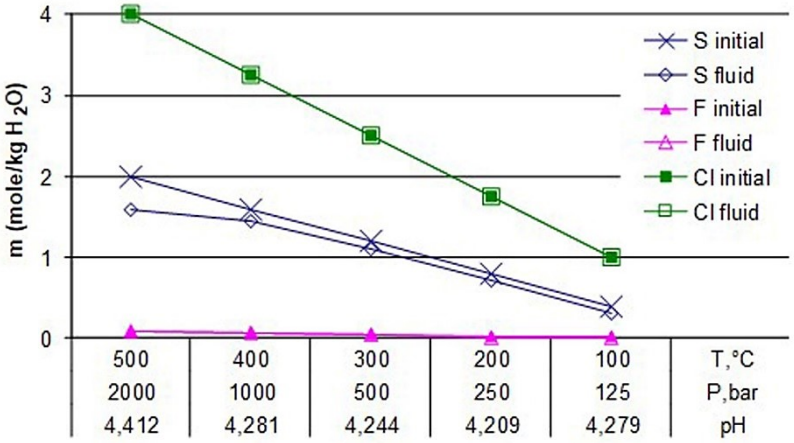


Рис. 2. Сравнение исходных концентраций макрокомпонентов с их конечными содержаниями в слабокислом флюиде, прореагировавшем с монацитом и кальцитом в условиях его охлаждения и одновременного разбавления

Fig. 2. Comparison of initial concentrations of macrocomponents with their final contents in a weakly acidic fluid that reacted with monazite and calcite under conditions of its cooling and simultaneous dilution

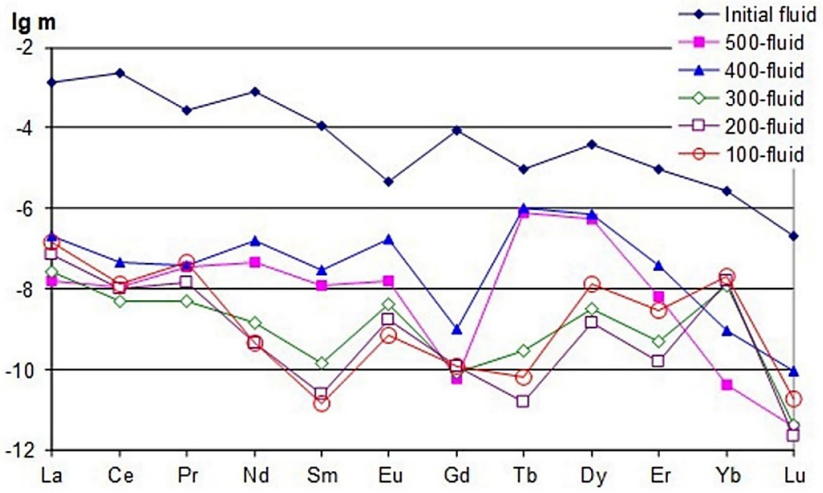


Рис. 3. Сравнение исходных концентраций лантаноидов с их конечными содержаниями в прореагировавшем с монацитом слабокислом флюиде в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 1)

Fig. 3. Comparison of the initial concentrations of lanthanides with their final contents in a weakly acid fluid that reacted with monazite under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 1)

На рис. 4 показано распределение по формам представителей легких РЗЭ (ЛРЗЭ) — La, Ce, Pr в зависимости от параметров слабокислого флюида в условиях его охлаждения и одновременного разбавления. Хорошо видно, что во всем исследованном интервале параметров флюида в основном преобладающими являются бисульфатные комплексы $Ln(SO_4)_2^-$ (а при температуре 100 °С еще и моносульфатный комплекс $Ln(SO_4)^+$), хотя концентрация сульфатной серы во флюиде значительно ниже концентрации хлорида (см. рис. 2), и только у Ce и Pr при 500 °С на первое место выходят их хлоридные комплексы $LnCl^{+2}$. При понижении температуры концентрация хлоридных комплексов уже не играет никакой роли.

Несмотря на появление среди устойчивых твердых фаз в интервале 300–100 °С РЗЭ-флюорита и РЗЭ-фторапатита, связывающих в виде твердой фазы фторид-ион, именно в этой области на второе значимое место выходят фторокомплексы LnF^{+2}, а затем и второй фторокомплекс LnF_2^+, при том, что концентрация фторида во флюиде на порядки ниже содержания хлорида (см. рис. 2). Остальные виды комплексов РЗЭ (гидроксо-, карбонатные и фосфатные) не вносят сколько-нибудь значительного вклада в транспорт легких лантаноидов в слабокислых условиях.

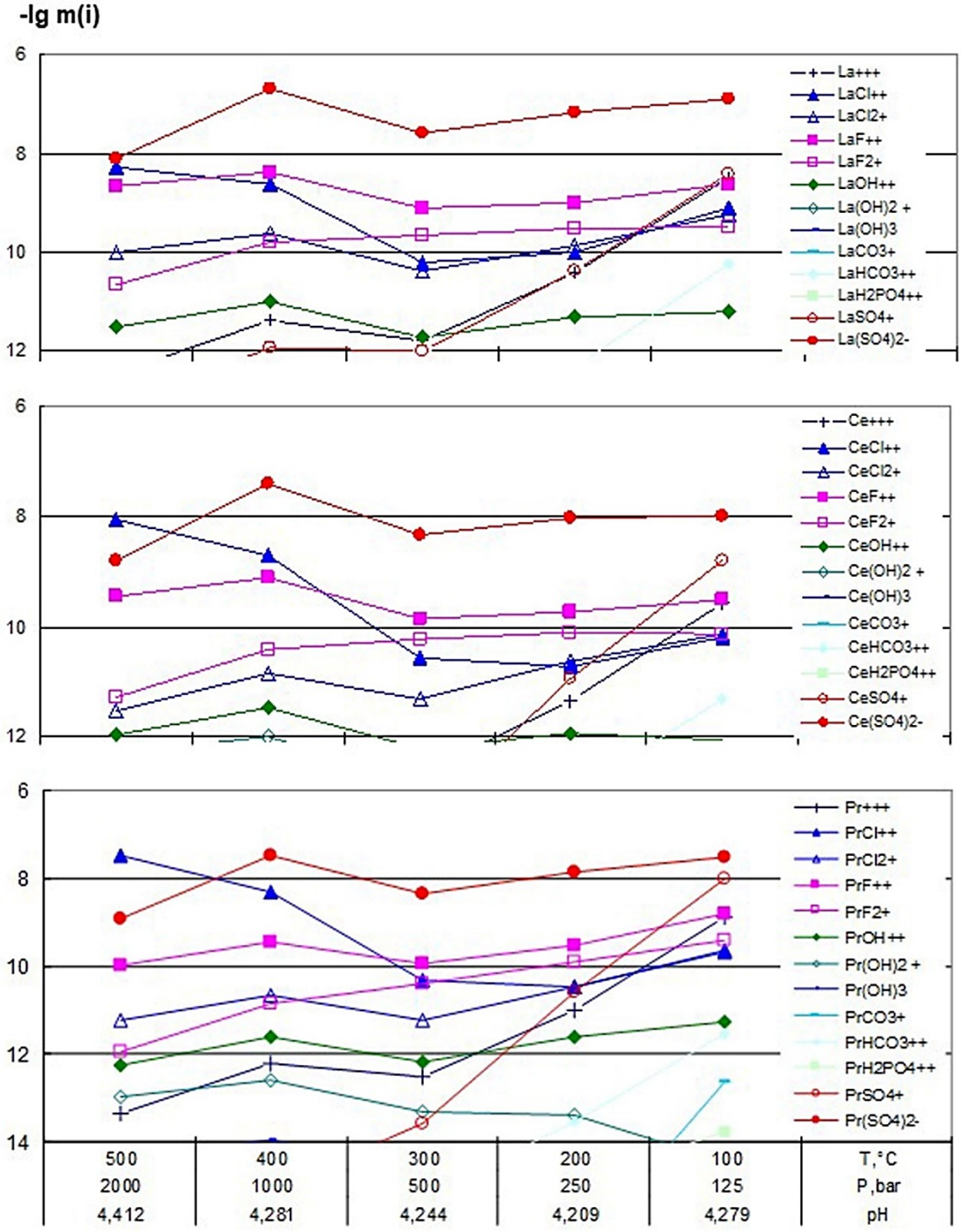


Рис. 4. Распределение по формам представителей легких РЗЭ (ЛРЗЭ) — La, Ce, Pr в зависимости от параметров слабокислого флюида в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 1)

Fig. 4. The distribution by forms of La, Ce, Pr, representatives of light REE (LREE), depending on the parameters of weakly acid fluid under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 1)

Рис. 5 представляет распределение по формам Nd, Sm и Gd в зависимости от параметров слабокислого флюида также в условиях его охлаждения и одновременного разбавления. Если у La, Ce, Pr после 400°C наблюдается некоторое увеличение концентрации их бисульфатных комплексов, то для Nd, Sm и Gd фиксируется обратная тенденция: концентрации тех же бисульфатных комплексов у Nd и Sm падают примерно на три порядка, у Gd от 400 к 300 °C понижается на порядок и далее остается на одном уровне. Хлорокомплексы $NdCl^{+2}$ и $SmCl^{+2}$ только при 500 и 400 °C занимают второе место по концентрации в равновесном флюиде. С дальнейшим с понижением температуры, как и ЛРЗЭ, они уступают место их фторокомплексам LnF^{+2}. В отличие от Nd и Sm, у гадолиния на второе место после бисульфатного комплекса во всем исследованном интервале параметров выступает второй фторокомплекс GdF_2^+. Такое поведение Nd, Sm и Gd во флюиде можно объяснить тем, что они предпочитают оставаться преимущественно в монаците, а гадолиний еще и накапливается в РЗЭ-флюорите.

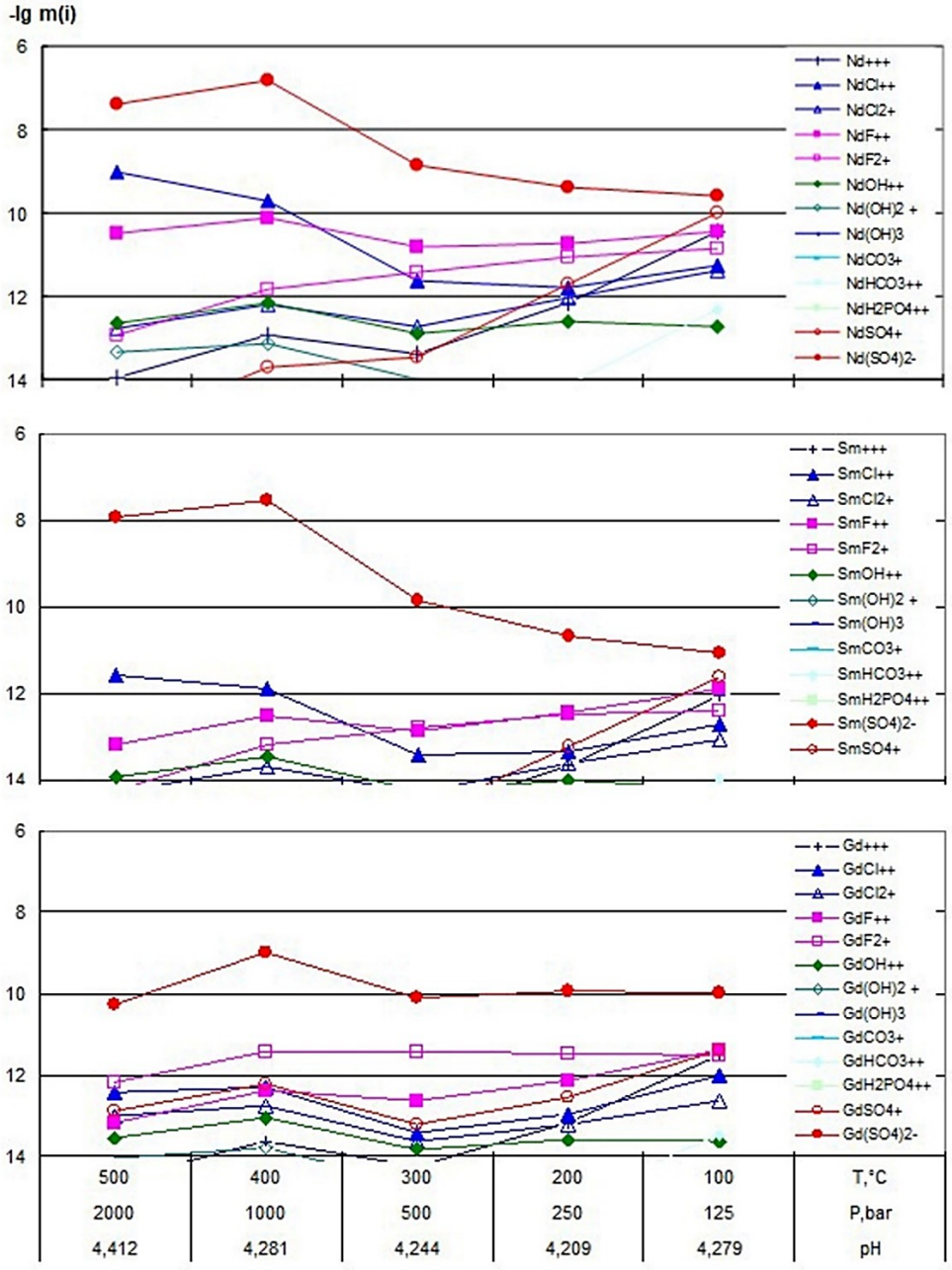


Рис. 5. Распределение по формам Nd, Sm и Gd в зависимости от параметров слабокислого флюида в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 1)

Fig. 5. The distribution by forms of Nd, Sm and Gd depending on the parameters of the weakly acid fluid under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 1)

На рис. 6 показано распределение по формам представителей тяжелых РЗЭ (ТРЗЭ) Tb, Dy и Er в зависимости от параметров слабокислого флюида. Преобладающими формами в равновесном флюиде по-прежнему оказываются сульфатные комплексы рассматриваемых лантаноидов, но у тербия ведущим становится моносульфатный комплекс $TbSO_4^+$ практически во всем интервале параметров за исключением температуры 100 °С, где на первое место снова выходит бисульфатный комплекс $Tb(SO_4)_2^+$. У диспрозия бисульфатный комплекс уже преобладает начиная с 300 °С, а у эрбия он оказывается ведущим во всем исследованном интервале параметров.

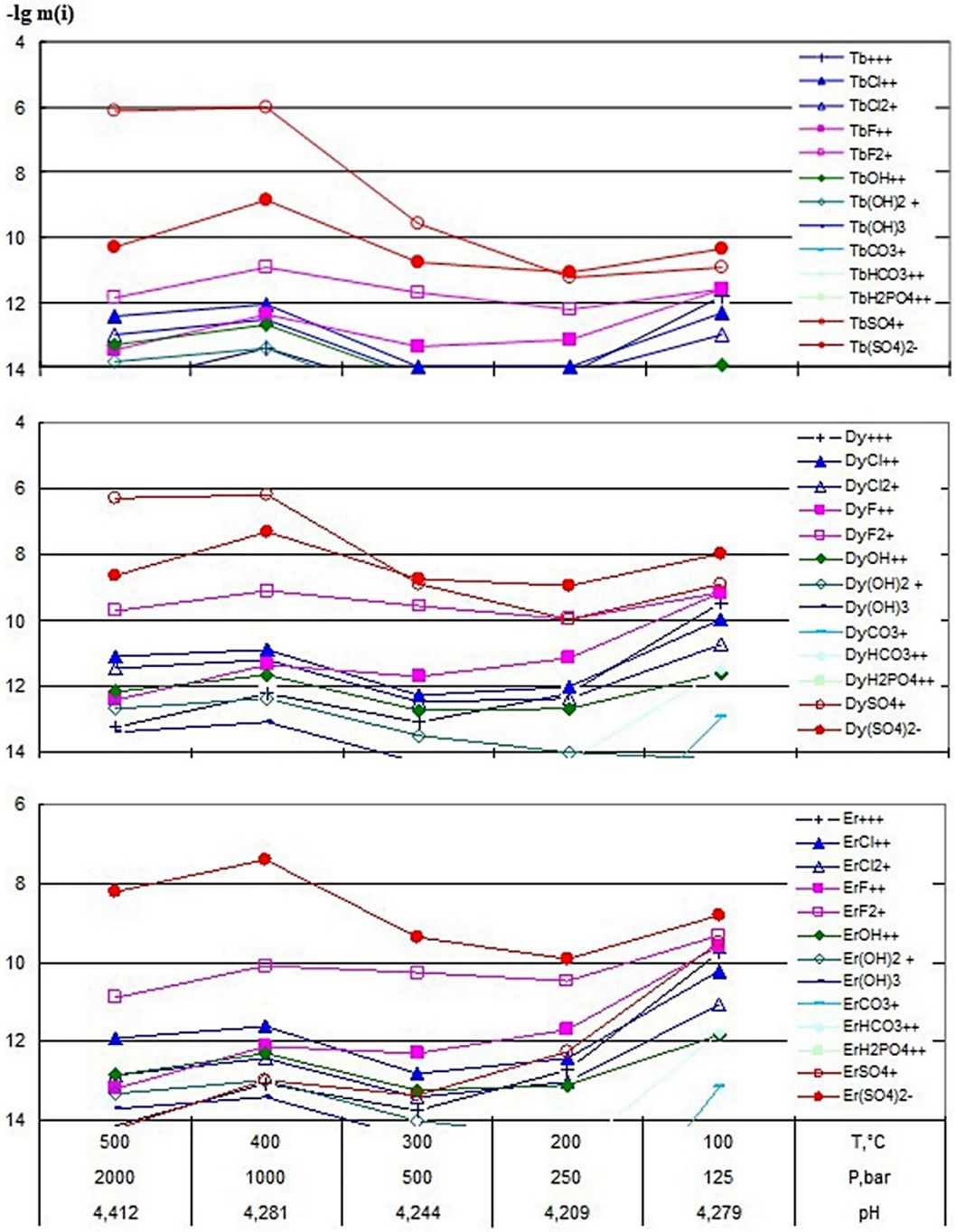


Рис. 6. Распределение по формам представителей тяжелых РЗЭ (Tb, Dy и Er) в зависимости от параметров слабокислого флюида в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 1)

Fig. 6. The distribution by forms of representatives of heavy REE (Tb, Dy and Er), depending on the parameters of weakly acid fluid under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 1)

Хлорокомплексы у ТРЗЭ занимают исключительно подчиненное положение, зато на следующее за моносульфатными — бисульфатными комплексами место выходят их вторые фторокомплексы LnF_2^+. Таким образом, с увеличением атомного номера лантаноида хлоридные комплексы уступают место фторидным, тогда как ведущая роль по-прежнему остается за бисульфат-моносульфатными формами.

Увеличение pH флюида более чем на единицу по сравнению со слабокислым вариантом после воздействия на ассоциацию монацит + кальцит **близнейтрального** (pH = 5,57) приводит к исчезновению из ассоциации устойчивых твердых фаз ксенотима и появлению при повышенных температурах РЗЭ-фторапатита и флюорита, которые здесь оказываются устойчивыми уже во всем диапазоне параметров. По-прежнему при 500–400 °C образуется тенардит, и во всем интервале параметров сохраняется ангидрит. Что касается суммарной концентрации лантаноидов в равновесном флюиде, то она в основном располагается в интервале 10^{-8}–10^{-11} m, и характеризуется меньшим разбросом значений (по сравнению с предыдущим слабокислым вариантом) благодаря постоянству твердофазовой РЗЭ-содержащей ассоциации. Относительно форм нахождения лантаноидов в равновесном флюиде следует заметить, что ведущими по-прежнему являются бисульфат-моносульфатные комплексы при аналогичном предыдущему варианту соотношении с хлоридными, фторидными и остальными комплексами.

Соотношение равновесных твердых фаз после воздействия на ассоциацию монацит + кальцит **слабощелочного** (pH = 7,47) фторидно-сульфатно-хлоридного охлаждающегося и разбавляющегося флюида в зависимости от его параметров, приведенных в подписях к оси абсцисс, показано на рис. 7. Характерной особенностью данного варианта оказывается появление среди устойчивых твердых фаз кальцита при пониженных температурах (300–100 °C), при устойчивости ангидрита только в области 500–400 °C, где во флюиде самые высокие концентрации сульфатной серы, здесь же оказывается устойчивым и тенардит. Во всем интервале параметров флюида устойчивы РЗЭ-флюорит, РЗЭ-фторапатит и остаток не прореагировавшего монацита. Аналогично рис. 1 на левой оси ординат даны содержания макрокомпонентов системы, показаны сплошными линиями. Отрицательные логарифмы концентраций РЗЭ-содержащих фаз показаны на левой оси ординат.

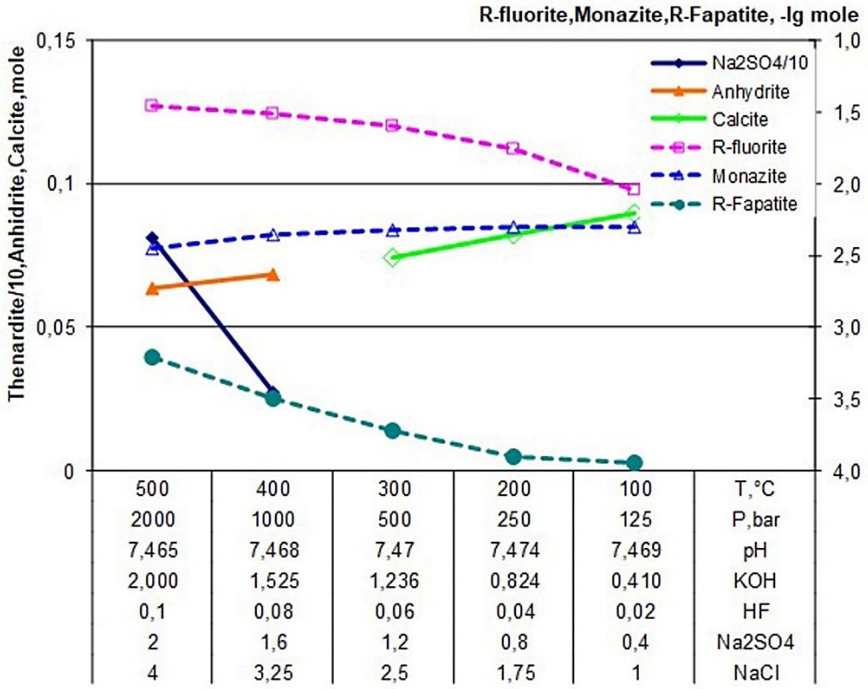


Рис. 7. Воздействие на монацит + кальцит слабощелочного (pH = 7,47) фторидно-сульфатно-хлоридного охлаждающегося и разбавляющегося флюида (см. подписи к оси абсцисс)

Fig. 7. Impact of weakly alkaline (pH = 7.47) fluoride-sulphate-chloride cooling and diluting fluid on monazite + calcite (see *x*-axis captions)

График сравнения исходных концентраций лантаноидов с конечными содержаниями в равновесном слабощелочном флюиде дан на рис. 8. По сравнению с предыдущими вариантами концентрации лантаноидов выше — они колеблются в интервале 10^{-5}–10^{-8} m и только при температуре 100 °C для Nd, средних РЗЭ и лютеция отмечается понижение концентраций до 10^{-10} m. Максимальная концентрация всех лантаноидов отмечается при температуре 300 °C, это хорошо объясняется при рассмотрении их форм нахождения во флюиде (рис. 9).

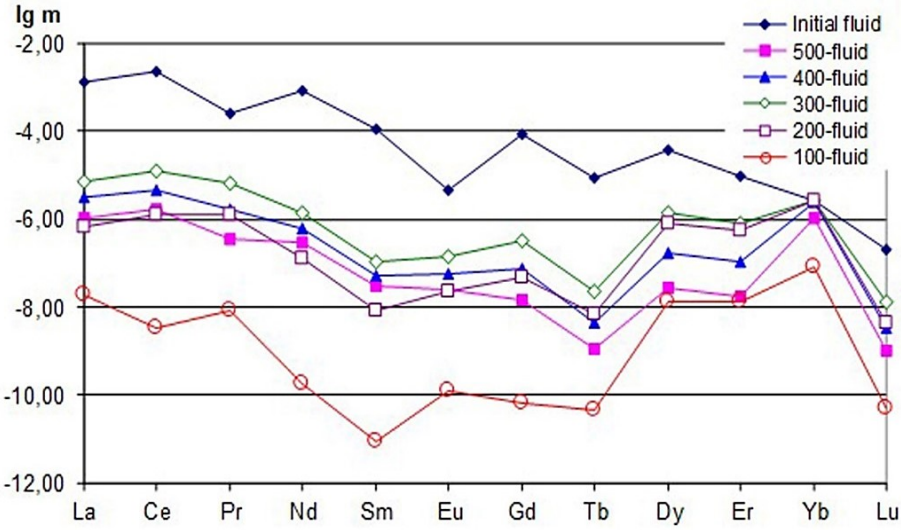


Рис. 8. Сравнение исходных концентраций лантаноидов с их конечными содержаниями в прореагировавшем с монацитом слабощелочном (pH = 7,47) флюиде в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 7)

Fig. 8. Comparison of the initial concentrations of lanthanides with their final contents in the weakly alkaline (pH = 7.47) fluid reacted with monazite under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 7)

Ввиду однотипности характера распределения РЗЭ в слабощелочном флюиде в зависимости от параметров флюида мы ограничились картинами распределения представителя легких (Ce), средних (Gd) и тяжелых (Er) лантаноидов (рис. 9). Во всех трех случаях ведущими являются гидроксокомплексы $Ln(OH)_3^0$ > $Ln(OH)_2^+$, концентрация которых повышается при понижении температуры от 500 к 300 °C, а затем резко падает при дальнейшем понижении температуры. Этим и объясняется максимум содержания лантаноидов во флюиде при тепературе 300 °C (рис. 8). На третьем месте оказывается бисульфатный комплекс $Ln(SO_4)_2^-$, следом за бисульфатным комплексом идет первый гидроксокомплекс $Ln(OH)^{+2}$ и далее — фторидные комплексы. Из них для легких РЗЭ оказывается более устойчивым первый фторокомплекс LnF^{+2}, тогда как с повышением номера лантаноида он уступает место второму фторокомплексу LnF_2^+. Из хлоридных комплексов только для Ce, Nd и Pr при 500 °C отмечается наличие первого хлорокомплекса $LnCl^{+2}$ в концентрациях 10^{-9}, 10^{-10} и 10^{-9} m соответственно.

Таким образом, в слабощелочных условиях, несмотря на самую высокую концентрацию NaCl в исходном и равновесном флюиде, хлорокомплексы не играют никакой роли для транспорта лантаноидов. Незначительный вклад вносят и бисульфат-моносульфатные комплексы, решающее же значение имеют гидроксокомплексы. Следует, однако, оговориться, что исходные термодинамические данные для них получены экстраполяцией от комнатных температур [21], поэтому может оказаться, что их роль завышена, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования устойчивости гидроксокомплексов РЗЭ при повышенных температурах. На диаграммах значения pH показаны с точностью до третьего знака — как было получено при расчетах по программе HCh. В легендах рис. 4–6 и рис. 9 приведен полный список учитывавшихся при расчетах частиц лантаноидов во флюидах, для которых имеются необходимые термодинамические данные для повышенных температур. Так как значимыми можно признать

концентрации комплексов более чем 10^{-10}–10^{-12} m, то карбонат-, бикарбонатные и фосфатные комплексы не попадают в поле зрения на этих диаграммах и в исследованном диапазоне параметров системы не играют значимой роли в транспорте лантаноидов, но, как и в случае с гидроксокомплексами, термодинамические данные для них в области повышенных температур получены экстраполяцией от комнатных температур [21]. Для этих комплексов также необходимы экспериментальные исследования констант их устойчивости при повышенных температурах.

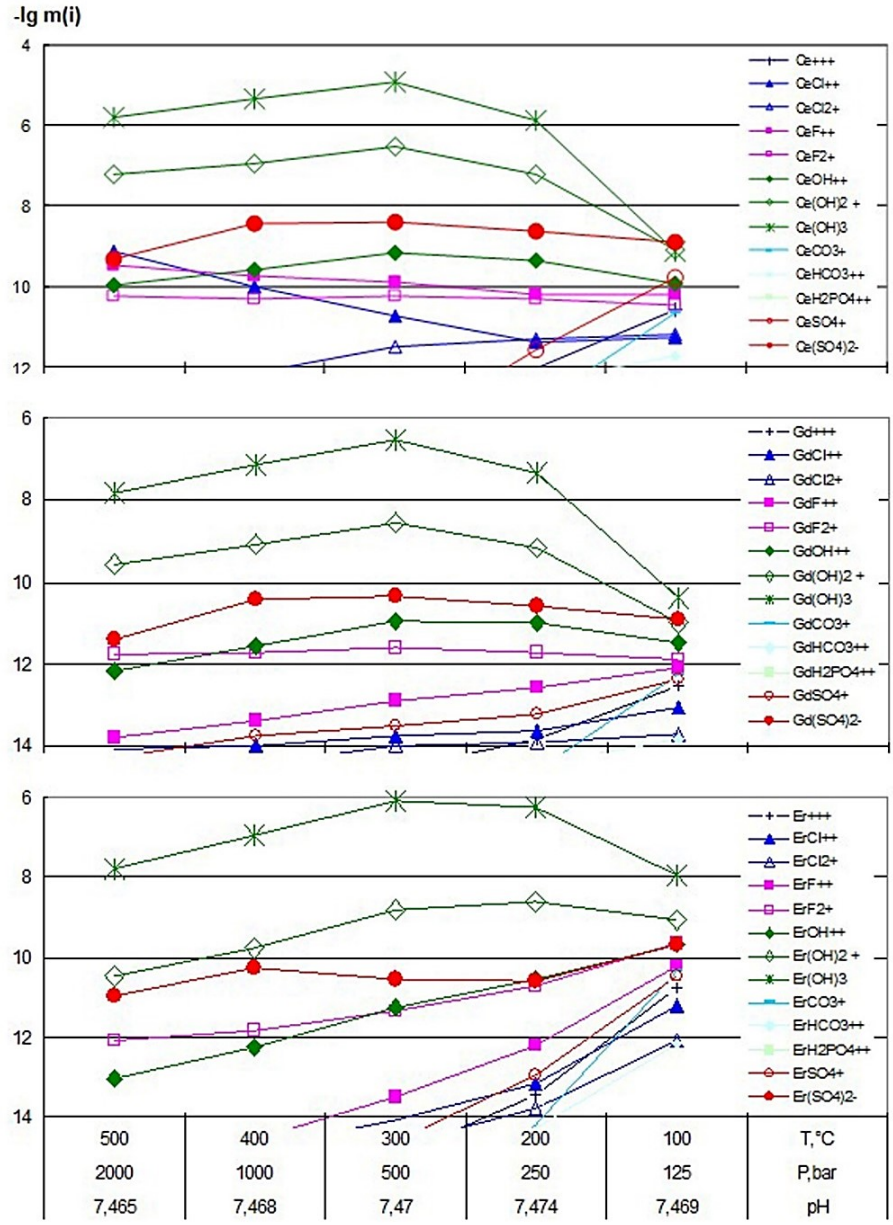


Рис. 9. Распределение по формам представителя легких (Ce), средних (Gd) и тяжелых (Er) лантаноидов в зависимости от параметров слабощелочного флюида в условиях его охлаждения и одновременного разбавления (см. подписи к оси абсцисс рис. 7)

Fig. 9. The distribution by the forms of the representative of light Ln (Ce), medium (Gd) and heavy (Er) lanthanides depending on the parameters of weakly alkaline fluid under conditions of its cooling and simultaneous dilution (see *x*-axis captions in fig. 7)

Заключение

Условиями задачи при снижении температуры предусмотрено системное понижение концентрации сульфатной серы, хлора и фтора в исходном флюиде. При этом, несмотря на более высокую концентрацию NaCl (от 4 до 1 m) по сравнению с концентрацией $NaHSO_4$ (от 2 до 0,4 m),

в слабокислых и близнейтральных условиях для всех лантаноидов ведущими оказываются бисульфатные и моносульфатные комплексы. Только у Ce и Pr при 500 °C в слабокислых условиях на первое место выходят их хлоридные комплексы $LnCl^{+2}$, а при понижении температуры концентрации хлоридных комплексов уже не играют никакой роли. Несмотря на значительно более низкую концентрацию фтора во флюиде (от 0,1 до 0,02 m) и образование фторсодержащих твердых фаз РЗЭ-флюорита и РЗЭ-фторапатита, фторокомплексы лантаноидов играют заметную роль в транспорте РЗЭ особенно в слабокислых и близнейтральных условиях. В слабощелочных условиях ведущими оказываются гидроксокомплексы лантаноидов. По-видимому, хлоридные комплексы будут играть важную роль в транспорте РЗЭ при отсутствии сульфатной серы и фтора. Анализ проведенного исследования показывает, что помимо T-P-условий существенную роль на поведение лантаноидов оказывает кислотность-щелочность флюидов. От этого параметра зависит не только распределение РЗЭ по формам в равновесном флюиде (в слабокислых и близнейтральных — бисульфат-моносульфатные, а в слабощелочных — гидроксокомплексы), но меняются и устойчивые твердофазовые ассоциации, которые, в свою очередь, влияют на конечную концентрацию лантаноидов во флюиде. Так, наличие ксенотима в равновесной ассоциации наблюдается только при 500–400 °C в слабокислых условиях, а при повышении pH вместо него становятся устойчивыми РЗЭ-фторапатит и РЗЭ-флюорит. Поскольку ксенотим помимо иттрия является носителем тяжелых РЗЭ, то исчезновение его из ассоциации приводит к повышению ТРЗЭ во флюиде, особенно это сказывается на концентрации иттербия. Если прочие тяжелые лантаноиды могут входить в РЗЭ-флюорит, то Yb, имея самую высокую растворимость его трифторида, оказывается преимущественно во флюиде. В слабощелочных условиях при пониженных температурах ангидрит уступает место кальциту, тогда как в слабокислых и близнейтральных условиях ангидрит устойчив во всем интервале исследованных параметров. Косвенным подтверждением транспорта РЗЭ сульфатными комплексами является установленное в статье [22] обогащение кальцита лантаноидами на поздних стадиях рудообразования вследствие выпадения барита $BaSO_4$ и целестина $SrSO_4$, которые обедняют сульфатом минералообразующие флюиды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uranium-Lead Dating of Hydrothermal Zircon and Monazite from the Sin Quyen Fe-Cu-REE-Au-(U) Deposit, NorthWestern Vietnam / *X. C. Li [et al.]* // Mineralium Deposita. 2018. Vol. 53. P. 399–416. **2.** *Shu X., Liu Y.* Fluid Inclusion Constraints on the Hydrothermal Evolution of the Dalucao Carbonatite-Related REE Deposit, Sichuan Province, China // Ore Geology Reviews. 2019. Vol.107. P. 41–57. **3.** *Zheng X., Liu Y.* Mechanisms of Element Precipitation in Carbonatite-Related Rare-Earth Element Deposits: Evidence from Fluid Inclusions in the Maoniuping Deposit, Sichuan Province, Southwestern China // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 107. P. 218–238. **4.** Mineralogical and Geochemical Study of Apatite and Dolomite from the Bayan Obo Giant Fe-REE-Nb Deposit in Inner Mongolia: New Evidences for Genesis / *Y. Rena [et al.]* // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 109. P. 381–406. **5.** The Role of Magmatic and Post-Magmatic Hydrothermal Processes on Rare-Earth Element Mineralization: A Study of the Bachu Carbonatites from the Tarim Large Igneous Province, NWChina / *Z. Cheng [et al.]* // Lithos. 2018. Vol. 314–315. P. 71–87. **6.** The Role of Chloride-Carbonate Melts in the Formation of Sideritic Carbonatites of the Karasug Fe-F-REE Deposit (Tyva Republic, Russia) / *I. R. Prokop'ev [et al.]* // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 455, Part 2. P. 446–449. **7.** Origin of REE Rich Ferrocarbonatites in Southern Siberia (Russia): Implications Based on Melt and Fluid Inclusions / *I. R. Prokopyev [et al.]* // Mineralogy and Petrology. 2016. Vol. 110, No. 6. P. 845–859. **8.** *Дорошкевич А. Г., Рипп Г. С.* К оценке условий образования редкоземельных карбонатитов Западного Забайкалья // Геология и Геофизика. 2004. Т. 45, № 4. С. 492–500. **9.** The Origin of Magnetite-Apatite Rocks of Mushgai-Khudag Complex, South Mongolia: Mineral Chemistry and Studies of Melt and Fluid Inclusions / *A. M. Nikolenko [et al.]* // Lithos. 2018. 320–321. P. 567–582. **10.** *Samson I. M., Wood S. A., Finucane K.* Fluid Inclusion Characteristics and Genesis of the Fluorite-Parisite Mineralization in the Snowbird Deposit, Montana // Economic Geology. 2004. Vol. 99. P. 1727–1744. **11.** Fluid Evolution and Ore Genesis of the Qibaoshan Polymetallic Ore Field, Shandong Province, China: Constraints from Fluid Inclusions and H-O-S Isotopic Compositions / *Yu Guang-Yuan [et al.]* // Minerals. 2019. Vol. 9 (7). P. 394. **12.** *Шваров Ю. В.* HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических процессов, предоставляемые Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903. **13.** Hydrothermal Transport, Deposition, and Fractionation of the REE: Experimental Data and Thermodynamic Calculations / *A. Migdisov [et al.]* // Chemical Geology. 2016. Vol. 439. P. 13–42. **14.** *Popa K., Konings R. J. M.* High-Temperature Heat Capacities of $EuPO_4$ and $SmPO_4$ Synthetic Monazites // Thermochimica Acta. 2006. Vol. 445. P. 49–52. **15.** *Gysi A. P., Williams-Jones A. E., Harlov D.* The Solubility of Xenotime-(Y) and other HREE Phosphates ($DyPO_4$, $ErPO_4$ and $YbPO_4$) in Aqueous Solutions from 100 to 250 °C and psat // Chemical Geology. 2015. Vol. 401. P. 83–95. **16.** Experimental Determination of the High Temperature Heat Capacity of a Natural Xenotime-(Y) Solid Solution and Synthetic $DyPO_4$ and $ErPO_4$ Endmembers / *A. P. Gysi [et al.]* // Thermochimica Acta. 2016. Vol. 627–629. P. 61–67. **17.** *Robie R. A., Hemingway B. S.* Thermodynamic

Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar (105 Pascals) Pressure and at Higher Temperatures // U.S. Geological Survey Bulletin. 1995. Vol. 2131. P. 461. **18.** *Johnson J. W., Oelkers E. H., Helgeson H. C.* SUPCRT92: a Software Package for Calculating the Standard Molal Thermodynamic Properties of Minerals, Gases, Aqueous Species, and Reactions from 1 to 5000 Bar and 0 to 1000 °C // Computer Geoscientist. 1992. Vol. 18. P. 899–947. **19.** *Tagirov B. R., Zotov A., Akinfiev N.* Experimental Study of Dissociation of HCl from 350 to 500 °C and from 500 to 2500 Bars: Thermodynamic Properties of HCl°(aq) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. Vol. 61. P. 4267–4280. **20.** *Широносова Г., Прокопьев И.* Коэффициенты распределения РЗЭ+Y между минералами и охлаждающимся богатым сульфатной серой флюидом (термодинамическое моделирование) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 10. С. 6–18. **21.** *Haas J., Shock E. L., Sassani D.* Rare Earth Elements in Hydrothermal Systems: Estimates of Standard Partial Molal Thermodynamic Properties of Aqueous Complexes of the Rare Earth Elements at High Pressures and Temperatures // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. P. 4329–4350. **22.** *Bai T., Chen W., Jiang S-Y.* Evolution of the Carbonatite Mo-HREE Deposits in the Lesser Qinling Orogen: Insights from in Situ Geochemical Investigation of Calcite and Sulfate // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 113. 103069.

Сведения об авторах

Широносова Галина Петровна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории щелочного магматизма и рудообразования Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН
E-mail: shiron@igm.nsc.ru
Прокопьев Илья Романович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории щелочного магматизма и рудообразования Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН; старший преподаватель Новосибирского государственного университета
E-mail prokop@igm.nsc.ru

Author Affiliation

Galina P. Shironosova — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of Alkaline Magmatism and Ore Formation of the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of RAS
E-mail: shiron@igm.nsc.ru
Ilya R. Prokopyev — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of Alkaline Magmatism and Ore Formation of the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of RAS; Senior Lecturer of the Novosibirsk State University
E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Библиографическое описание статьи

Широносова, Г. П. Оценка роли сульфатной серы в транспорте лантаноидов окисленными флюидами при формировании месторождений с редкоземельной минерализацией (термодинамическое моделирование) / *Г. П. Широносова, И. Р. Прокопьев* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 80–91.

Reference

Shironosova Galina P., Prokopyev Ilya R. Estimation of the Role of Sulfate Sulfur in the Transport of Lanthanides by Oxidized Fluids in the Formation of Deposits with Rare Earth Mineralization (Thermodynamic Modeling). *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 80–91. (In Russ.).

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.92-97
УДК 622.778

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ МЕТОДАМИ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Т. А. Яковлева, А. А. Управителева, В. А. Абурова
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация

Актуальной задачей для железорудных предприятий России является переработка окисленных железных руд, которые на сегодняшний день не вовлечены в переработку. В качестве объекта исследования выступали три пробы окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения. По итогам исследования представлены результаты, которые говорят о возможности получать магнитными методами обогащения железорудный концентрат с качеством $\beta_{Fe_{общ}}$ = 66 % при β_{SiO_2} менее 8 %.

Ключевые слова:

магнитное обогащение, мокрое магнитное обогащение, окисленные железистые кварциты, высокоградиентное магнитное обогащение, измельчение, обогащение в слабом магнитном поле.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING HIGH-QUALITY CONCENTRATES FROM OXIDIZED FERRUGINOUS QUARTZITES BY MAGNETIC SEPARATION METHODS

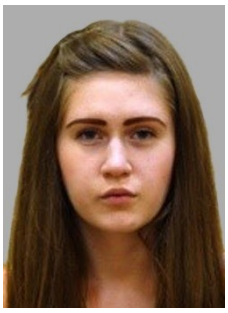
Tatiana A. Iakovleva, Anna A. Upraviteleva, Valeria A. Aburova
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

Abstract

An urgent task for iron ore enterprises in Russia is the processing of oxidized iron ores, which today are not involved in processing. Three samples of oxidized ferruginous quartzites Mikhailovsky deposit were presented as an object of study. The presented results indicate the possibility of obtaining iron ore concentrate by magnetic separation methods with the quality β_{Fe} = 66 % and β_{SiO_2} less then 8 %.

Keywords:

magnetic separation, wet magnetic separation, oxidized ferruginous quartzites, high-gradient magnetic separation, grinding, LIMS magnetic separation.



Введение

Проблема обогащения окисленных железистых кварцитов является весьма актуальной, так как в процессе добычи и переработки магнетитовых руд доля окисленных руд на железорудных предприятиях достигает 10–30 %, которые на 90 % теряются с хвостами переработки.

Вовлечение в переработку окисленных железистых кварцитов попутной добычи является наиболее перспективным источником роста производства концентратов без увеличения объемов добычи магнетитовых руд [1–4].

Целью работы было исследование возможности получения железорудного концентрата с качеством $\beta_{Fe_{общ}}$ = 66 % и β_{SiO_2} менее 8 % (далее — товарный концентрат) [5]. В качестве объекта исследования были выбраны три пробы окисленных железистых кварцитов (далее — ОЖК) Михайловского месторождения.

Материал и методика исследований

Объектом исследований являлись три пробы ОЖК Михайловского месторождения. Данные химического анализа проб 1, 2 и 3 представлены в табл. 1. Согласно данным таблицы, основными компонентами в них являются оксиды железа и кремния.

Таблица 1
Table 1

Химический анализ проб
Chemical analysis of samples

Компонент Component	Содержание / Content, %		
	Проба / Sample 1	Проба / Sample 2	Проба / Sample 3
SiO_2	40,60	41,80	41,50
Al_2O_3	0,14	0,08	0,11
$Fe_{общ}$ Fe_{total}	40,80	40,40	40,60
P_2O_5	0,12	0,08	0,08
MgO	0,25	0,16	0,20
CaO	0,69	0,64	0,74
K_2O	0,38	0,24	0,34
P_2O_5	0,12	0,08	0,08
$S_{общ}$ S_{total}	0,02	0,04	0,03

В первой части исследования был произведен анализ двух технологических схем магнитного обогащения ОЖК, представленных на рис. 1 и в табл. 2. Полученные результаты показали преимущества магнитного обогащения по технологической схеме 1, которая к тому же является простой для реализации в аппаратурном виде на обогатительной фабрике [6–8].

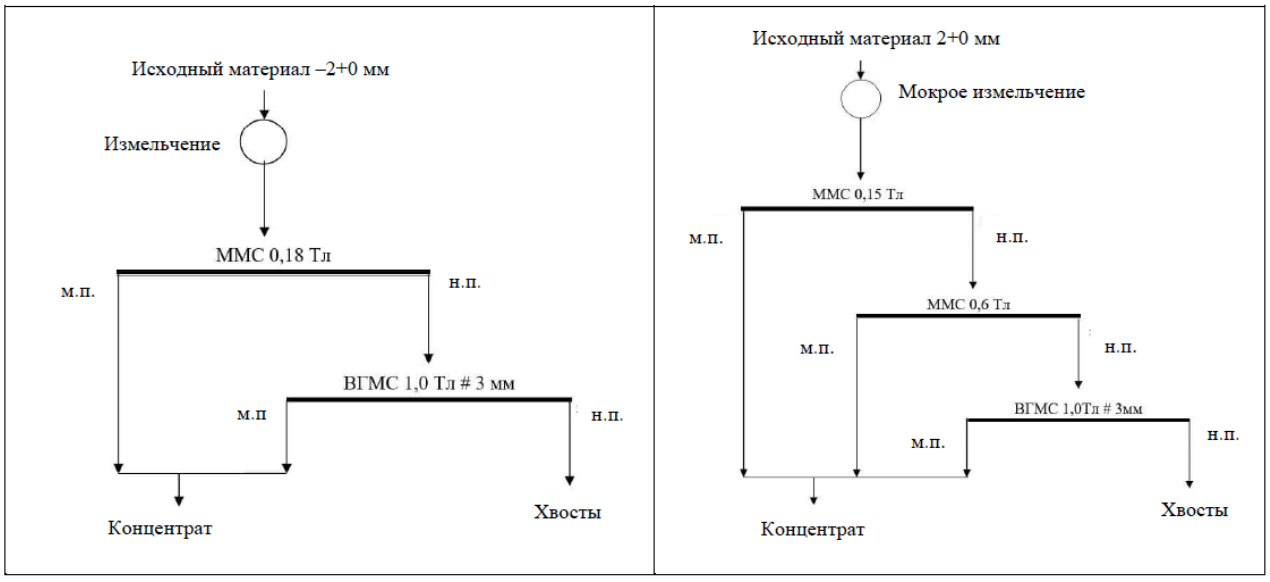


Схема 1 ***Схема 2***

Рис. 1. Одностадиальные технологические схемы мокрого магнитного обогащения
Fig. 1. Single-stage wet magnetic separation schemes

Основные технологические показатели магнитного обогащения первой стадии не позволили достичь требуемых величин $\beta_{Fe_{общ}}$ и β_{SiO_2}. Был проведен минералогический анализ ОЖК, который показал необходимость измельчения объединенного магнитного продукта первой стадии

магнитного обогащения до крупности класса P_{95} = 45 мкм. Параметры второй стадии измельчения объединенных магнитных продуктов представлены в табл. 4. Продукт второй стадии измельчения повторно подвергался магнитному обогащению по технологической схеме в условиях, представленных в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты опытов мокрого магнитного обогащения по схеме 1 и схеме 2
The results of experiments wet magnetic separation according to Scheme 1 and Scheme 2

Номер пробы Sample Number	Продукт Product	γ, %		$\beta_{Fe_{общ}}$, % $\beta_{Fe_{total}}$, %		ε, %		SiO_2, %	
		Схема 1 Scheme 1	Схема 2 Scheme 2	Схема 1 Scheme 1	Схема 2 Scheme 2	Схема 1 Scheme 1	Схема 2 Scheme 2	Схема 1 Scheme 1	Схема 2 Scheme 2
1	Концентрат	66,6	63,3	52,9	54,1	86,4	83,9	24,2	22,0
	Хвосты	33,4	36,7	16,6	17,9	13,6	16,1	73,0	72,6
	Исходный	100,0	100,0	40,8	40,8	100,0	100,0	40,6	40,6
2	Концентрат	68,9	63,7	52,7	53,3	89,4	84,0	24,9	22,6
	Хвосты	31,4	36,3	13,6	16,9	10,6	16,0	78,7	75,5
	Исходный	100,0	100,0	40,4	40,4	100,0	100,0	41,8	41,8
3	Концентрат	67,8	63,4	52,7	53,7	87,9	83,9	25,0	23,3
	Хвосты	32,2	36,6	15,2	17,8	12,1	16,1	76,3	13,0
	Исходный	100,0	100,0	40,6	40,6	100,0	100,0	41,50	41,5

Таблица 3
Table 3

Параметры мокрого магнитного обогащения I и II стадии
Parameters of wet magnetic separation of I and II stages

Параметр Parameter	I стадия I stage	II стадия II stage
Мокрая магнитная сепарация (ПБМ 25-10) Wet magnetic separation (PBM 25-10)		
Индукция магнитного поля, Тл Magnetic field induction, T	0,12	0,09
Скорость вращения барабана, мин$^{-1}$ Shell rotation speed, min^{-1}	35	35
Режим работы сепаратора Separator mode	Прямоточный Direct-flow	Прямоточный Direct-flow
Высокоградиентная магнитная сепарация (SLON 100) High Gradient Magnetic Separation (SLON 100)		
Тип используемой матрицы Type of the matrix	Стержневая Rod	Стержневая Rod
Диаметр стержня матрицы, мм Diameter of the matrix rod, mm	3,0	1,0
Индукция магнитного поля, Тл Magnetic field induction, T	1,0	1,2
Частота пульсации, мин$^{-1}$ Pulsation frequency, min^{-1}	250	250
Масса одной пробы питания, г/цикл The mass of one feed sample, g/cycle	200	200
Содержание твердого в питании, % The solid content in the feed, %	30	30
Расход промывочной воды, л/мин Flushing water consumption, l/min	10	10

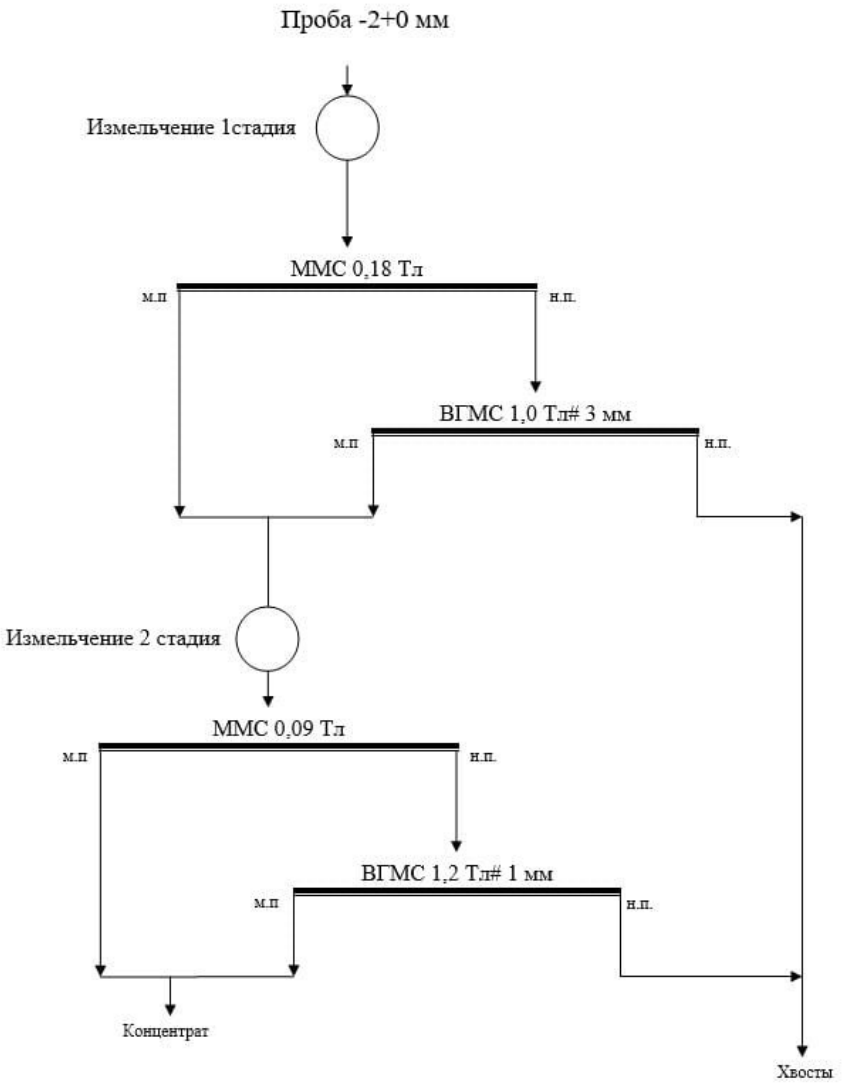


Рис. 2 Двухстадиальная технологическая схема магнитного обогащения
Fig. 2 Two-stages technological scheme of magnetic separation

Таблица 4
Table 4

Параметры измельчения руды ОЖК Михайловского месторождения
The ore grinding parameters of the oxidized ferruginous quartzites of the Mikhailovsky deposit

Параметр Parameter	I стадия I stage	II стадия II stage
Тип мельницы Type of mill	Шаровая Ball	Шаровая Ball
Внутренние размеры, мм Internal dimensions, mm	240×200	170×125
Полезный объем, м^3 Useful volume, m^3	0,007	0,002085
Частота вращения, мин$^{-1}$ Rotation frequency, min^{-1}	70	97
Степень заполнения мельницы рудой, % Degree of filling of the mill with ore, %	10	10
Масса шаровой загрузки, кг Ball load mass, kg	13	3,4

Окончание таблицы 4
Table 4 (Continued)

Параметр Parameter	I стадия I stage	II стадия II stage
Состав измельчающей среды, % Composition of the grinding medium, %	Шары / Balls Ø40 мм — 70 Ø30 мм — 15 Ø20 мм — 15	Цильпебсы 25×38 мм — 100 Cylpebs 25×38 mm — 100
Масса навески, кг Weight of the sample, kg	1,450	0,430
Количество воды, мл The amount of water, ml	624	215

Итоги опытов мокрого магнитного обогащения с применением двухстадиальной технологической схемы магнитного обогащения представлены в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Результаты двухстадиальной технологической схемы магнитного обогащения
The results of two-stage magnetic separation flowsheet

Номер пробы Sample Number	Продукт Product	γ, %	$\beta_{Fe_{общ}}$, % $\beta_{Fe_{total}}$, %	ε, %	SiO_2, %
1	Продукт ММС II стадии Product of WMS of the II stage	10,7	**66,0**	17,3	**7,2**
	Продукт ВГМС II стадии Product of HGMS of the II stage	41,6	56,6	57,7	17,9
	Концентрат Concentrate	52,3	58,5	75,0	15,7
	Хвосты Tailings	47,7	21,4	25,0	67,9
	Исходный Initial	100,0	40,80	100,0	40,60
2	Продукт ММС II стадии Product of WMS of the II stage	11,7	**66,1**	19,2	**4,9**
	Продукт ВГМС II стадии Product of HGMS of the II stage	40,1	56,7	56,2	16,2
	Концентрат Concentrate	51,8	58,8	75,4	13,60
	Хвосты Tailings	48,2	20,6	24,6	72,1
	Исходный Initial	100,0	40,4	100,0	41,8
3	Продукт ММС II стадии Product of WMS of the II stage	9,9	**66,1**	16,2	**8,0**
	Продукт ВГМС II стадии Product of HGMS of the II stage	43,3	56,6	60,4	16,9
	Концентрат Concentrate	53,3	58,4	76,59	15,2
	Хвосты Tailings	46,7	20,3	23,4	71,5
	Исходный Initial	100,0	40,6	100,0	41,5

Результаты и их обсуждение

Анализ основных технологических показателей для трех проб ОЖК Михайловского месторождения, полученных после двухстадиального магнитного обогащения, показывает возможность получения качества $\beta_{Fe_{общ}}$ = 66 % и β_{SiO_2} менее 8 % для продукта ММС II стадии. Объединенный продукт магнитного обогащения имеет средние технологические показатели для трех проб ОЖК $\beta_{Fe_{общ}}$ = 58,6 % и β_{SiO_2} = 14,8 %, что позволяет рекомендовать последующие операции флотационного обогащения для получения заданного качества.

Выводы

В результате проведенных лабораторных исследований магнитного обогащения ОЖК Михайловского месторождения удалось достичь в магнетитовом цикле (магнитный продукт второй стадии ММС) необходимого качества концентрата $\beta_{Fe_{общ}}$ = 66 % и β_{SiO_2} менее 8 % для всех трех технологических проб, при среднем выходе 10,8 %. Эти данные позволяют рассмотреть вариант вывода данного магнитного продукта для объединения с концентратом текущего магнетитового производства на обогатительной фабрике МГОКа.

Магнитный продукт после ВГМС необходимо выводить в отдельный цикл и дообогащать методами флотационного обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ширяев А. А., Величко Ю. В., Ботвинников В. В.* Особенности технологии подготовки и обогащения окисленных железистых кварцитов со стадиальным выделением концентрата // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2005. № 4. С 96–103. **2.** *Гзогян Т. Н.* К вопросу получения гематитового концентрата на Михайловском ГОКе // Горн. информ.-аналит. бюлл.: [науч.-техн. журн.]. 2001. №. 3. С 227–231. **3.** *Кусков В. Б., Львов В. В.* Обогащение и переработка железных руд различного генезиса // Горн. информ.-аналит. бюлл.: [науч.-техн. журн.]. 2018. № S56. С. 44–53. **4.** *Гзогян Т. Н.* Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов // Горн. информ.-аналит. бюлл.: [науч.-техн. журн.]. 2010. №. 4. С 389–394. **5.** *Максимов И. И., Сентемникова В. А.* Исследование и разработка энергосберегающих технологий получения высококачественных концентратов из окисленных руд // Обогащение руд. 2011. № 6. С. 3–7. **6.** *Kuskov V. B., Lvov V. V.* A Treatability Study of the Bakcharskoye Deposit Iron Ores Concentration by Means of High-Intensity Magnetic Separation // Obogashchenie Rud (Mineral processing). 2015. No. 1. P 26–30. **7.**Magnetic Separation of Eudialyte Ore under Pulp Pulsation / *G. P. Andronov [et al.]* // J. Mining Science. 2016. Vol. 52, Issue 6. P. 1190–1194. **8.** *Aleksandrova T. N., Lvov V. V.* The Use of High-Gradient Magnetic Separation to Increase the Efficiency of Extraction of Magnetic Fraction from Coal Combustion Waste // 16th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (2016, June 28 — July 6). 2016. Book 4, Vol. 2. P. 165–170.

Сведения об авторах

Яковлева Татьяна Александровна — студентка Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: s141438@stud.spmi.ru
Управителева Анна Андреевна — студентка Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: s151039@stud.spmi.ru
Абурова Валерия Александровна — студентка Санкт-Петербургского горного университета
E-mail: s161043@stud.spmi.ru

Author affiliation

Tatiana A. Iakovleva — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: s141438@stud.spmi.ru; iakovvleva@gmail.com
Anna A. Upraviteleva — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: s151039@stud.spmi.ru
Valeria A. Aburova — Student of the Saint Petersburg Mining University
E-mail: s161043@stud.spmi.ru

Библиографическое описание статьи

Яковлева, Т. А. Исследование возможности получения высококачественных концентратов из окисленных железистых кварцитов методами магнитной сепарации / *Т. А. Яковлева, А. А. Управителева, В. А. Абурова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 92–97.

Reference

Iakovleva Tatiana A., Upraviteleva Anna A., Aburova Valeria A. Study of the Possibility of Obtaining High-Quality Concentrates from Oxidized Ferruginous Quartzites by Magnetic Separation Methods. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 4 (11), pp. 92–97. (In Russ.).

XXX Молодежная научная школа-конференция, посвященная памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца и акад. РАН Ф. П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии»

Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, 7–11 октября 2019 г.

В конференции приняли участие молодые ученые, аспиранты, студенты ведущих научных и образовательных учреждений Москвы, Санкт-Петербурга, Петрозаводска, Уфы и других городов России и Республики Беларусь.

Мероприятие проводится под эгидой советов молодых ученых различных научных организаций. Место проведения меняется каждый год, юбилейная XXX конференция была проведена в г. Апатиты на базе Геологического института ФИЦ «Кольский научный центр РАН».

Пленарное заседание в Большом зале Президиума КНЦ РАН приветственным словом открыл директор Геологического института Н. Е. Козлов, д. г.-м. н., профессор. Проблемы экологической безопасности, зеленых технологий и устойчивого развития осветил в пленарном докладе В. А. Маслобоев, д. т. н., советник руководителя ФИЦ КНЦ РАН. Презентацией «Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород» пленарное заседание продолжил Э. В. Каспарьян, д. т. н., ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН. Т. Л. Паникоровский, руководитель лаборатории природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ФИЦ КНЦ РАН, завершил пленарную сессию докладом об открытии новых минералов и создании на их базе искусственных аналогов для промышленного применения.

Программа XXX Молодежной научной школы-конференции включала доклады по актуальным и фундаментальным вопросам современной геофизики и геоэкологии:

- научные основы прогнозирования месторождений стратегических полезных ископаемых арктического региона;
- проблемы генезиса рудных концентраций элементов платиновой группы и происхождения золоторудных зон в месторождениях различных типов;
- проблема кинематики деформаций в докембрии;
- проблемы магматической и метаморфической петрологии;
- проблемы восстановления траектории движения литосферных плит и формирования Балтийского щита;
- проблемы палеогеографических реконструкций голоцена.

Помимо пленарной сессии и секционной работы были организованы полевые экскурсии на геологические объекты Кольского п-ова. По итогам конференции будет опубликован сборник полнотекстовых научных статей.

Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле»

Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, 15–17 октября 2019 г.

Всероссийская научно-техническая конференция «Цифровые технологии в горном деле» уже стала традиционной и проводилась в Горном институте КНЦ РАН в третий раз.

В ее работе приняли участие 125 человек, в том числе 1 член-корреспондент РАН, 13 докторов наук, 27 кандидатов наук из России, Республики Беларусь. В числе участников конференции представители 31 организации, в том числе из 8 академических институтов.

Заслушано 56 докладов, из них 7 пленарных.

В пленарных докладах были рассмотрены актуальные проблемы применения информационных технологий в горнодобывающей отрасли: цифровая трансформация горнодобывающей промышленности, задачи организации и применения геоинформационного мониторинга горного производства, основные тенденции создания, развития и применения программных средств для повышения эффективности и безопасности горных работ при разработке месторождений Кольского п-ова, Урала, Сибири, а также вопросы цифровизации обогатительного производства как основы разработки инновационных технологий переработки минерального сырья.

На заседаниях секций отмечен высокий уровень представленных в докладах результатов фундаментальных исследований, ориентированных на применение цифровых технологий в горном деле.

На секции «Цифровые технологии и компьютерное моделирование объектов и процессов горного производства для решения задач рациональной и безопасной отработки месторождений полезных ископаемых» заслушано 22 доклада. Представлены результаты фундаментальных и прикладных исследований в области применения цифровых технологий для решения задач проектирования, планирования и сопровождения открытых и подземных горных работ. Апробация программных продуктов на различных горнодобывающих предприятиях позволяет учесть специфику отработки различных месторождений.

На секции «Цифровые технологии в геомеханическом обеспечении горных работ» заслушано 14 докладов. Основной тематикой стало обсуждение возможностей применения цифровых технологий для решения геомеханических проблем при ведении горных работ на карьерах и в подземных рудниках на больших глубинах, моделирования геомеханических процессов при разработке месторождений. Были представлены доклады о применении цифровых технологий в задачах геомеханического обеспечения безопасности горных работ и геомеханического мониторинга горнодобывающих объектов. Представлены современные методы анализа результатов сейсмического и других видов мониторинга.

На секции «Цифровые технологии и компьютерное моделирование для решения задач комплексной переработки минерального сырья и экологических проблем горного производства» заслушано 13 докладов. В них отражены вопросы моделирования обогатительных аппаратов, постановки вычислительных экспериментов с целью прогнозной оценки технологических показателей обогащения при совершенствовании оборудования или при изменении параметров процесса. Представлены доклады о применении цифровых технологий в процессах рудоподготовки и предконцентрации.

Отмечено высокое значение вычислительного эксперимента как для исследования процессов добычи и переработки минерального сырья, так и в решении экологических проблем горной отрасли. Развитие цифровых технологий необходимо для проведения исследований на основе моделирования, выявления закономерностей, построения различного рода прогнозов в целях обеспечения промышленной и экологической безопасности при ведении горных работ.

На сегодняшний день цифровые технологии стали приносить реальные преимущества. Их внедрение в горной промышленности позволяет повысить эффективность горного производства за счет использования существенно большего объема данных о ресурсах (минеральных, производственных, трудовых), мониторинга техногенных и природных процессов, анализа и совершенствования проектных и управленческих решений горных компаний России и мира.

XVI Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках»
Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, 22 октября 2019 г.

22 октября 2019 г. в Геологическом институте КНЦ РАН при информационной поддержке Кольского отделения и Комиссии по истории РМО прошла XVI Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках». В ней приняли участие сотрудники академических институтов, университетов и горно-геологических компаний из российских городов: Апатиты (ГИ КНЦ РАН, ИППЭС КНЦ РАН, ПГИ), Владимир (ВГУ), Мирный (НИГП АК «АЛРОСА»), Москва (МГУ, МГТУ), Петрозаводск (ПетрГУ), Санкт-Петербург (СПбГУ, ААНИИ), Тольятти (Институт направленного профессионального образования). По материалам школы подготовлен сборник трудов, в который вошли 17 статей.

Основное внимание участников было направлено на поиск универсальных математических подходов к решению широкого круга задач в естественных науках. Доклады были посвящены комбинаторной теории выпуклых многогранников, решетчатым разбиениям пространства и кристаллическим структурам с широким привлечением комбинаторики, теории графов, кристаллографического анализа и программно-вычислительных методов. Многие работы отражали вопросы широкой геологической тематики — от минералогии и условий образования алмазов в кимберлитах до классификации петрографических структур и акустополярископии. Используемый здесь инструментарий — математическое моделирование, компьютерные

вычисления и статистические методы анализа данных. В отношении последних необходимо отметить материалы о закономерностях пространственного распределения спутников алмазов в кимберлитовых полях Анголы.

Свое место нашли также доклады по биологии и экологии, где широко применяются статистические методы, например, для оценки однородности данных метеонаблюдений, анализа годичной динамики температур горных почв и при математическом моделировании морских экосистем.

Первый образовательный семинар для саамской молодежи Мурманской области по сценарному прогнозированию «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений»
ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», 2–3 ноября 2019 г.

2–3 ноября 2019 г. на базе Кольского научного центра РАН прошел Первый образовательный семинар для саамской молодежи Мурманской обл. по сценарному прогнозированию «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений». В семинаре приняли участия 52 человека из населенных пунктов Мурманской обл. (Мурманск, Апатиты, Оленегорск, Ковдор, Мончегорск, Ловозеро, Ёна), а также из Санкт-Петербурга и Москвы.

Организаторами выступили научные учреждения ФИЦ КНЦ РАН — Институт проблем промышленной экологии Севера и Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина, а также Лаборатория устойчивого развития Проектного офиса развития Арктики (ЛУР ПОРА), Фонд саамского наследия и развития в партнерстве с Центром содействия КМНС (Москва).

Главная задача семинара состояла в том, чтобы в доступной форме рассказать саамскому сообществу об итогах научных исследований происходящих изменений в арктических экосистемах и обществе, которые происходят под влиянием изменения климата, а также являются результатом антропогенных воздействий. Отдельный блок был посвящен традиционным знаниям и их использованию при адаптации к меняющемуся миру.

Вторая часть мероприятия была посвящена созданию сценариев развития Мурманской обл. до 2050 г. через призму будущего саамов. К основным движущим силам, участники отнесли права коренного народа и диалог с властью, экологическую политику, человеческий потенциал и традиционную культуру.

Исходя из того, как эти драйверы проявят себя к 2050 г., разработали четыре рассказа о будущем. Все четыре сценария получились оптимистичными. Даже в неблагоприятных внешних условиях Мурманская обл. идет к сохранению коренных народов и их традиционной культуры. Наиболее желательным сценарием признан тот, в котором губернатором Мурманской обл. станет представитель народа саами.

В 2020 г. пройдет еще два подобных семинара.

Региональный молодежный форум «Молодая наука Арктики» и Всероссийская конференция-школа молодых ученых и специалистов «Развитие технологий добычи и обогащения месторождений полезных ископаемых»
Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, 12–14 ноября 2019 г.

Мероприятия прошли при поддержке гранта Министерства образования и науки Мурманской обл. В работе конференции приняли участие 107 человек. В числе участников конференции-школы представители 7 подразделений ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН, ИЭП КНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН, ИХТРЭМС КНЦ РАН, ЦЭС КНЦ РАН, Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ФИЦ КНЦ РАН, Научно-инновационный отдел ФИЦ КНЦ РАН) и Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН (г. Якутск). Среди участникоа также были образовательные учреждения: МАГУ, представленный филиалами в городах Апатиты и Кировск, МГТУ, Санкт-Петербургский горный университет. Не остались в стороне и организации — Кировский филиал АО «Апатит», АО «СЗФК», «Мурманский региональный инновационный бизнес-инкубатор».

Чтобы расширить территорию диалога и обеспечить продуктивную работу форума, обмен знаниями и опытом научных школ, в режиме реального времени организован телемост с Санкт-Петербургским горным университетом и Институтом горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения РАН.

Конференция-школа включала в себя проведение научной школы, ознакомление с работами молодых ученых и специалистов, серию мастер-классов, тренинг личностного и профессионального самоопределения, экскурсии на производственные подразделения КФ АО «Апатит» и музейно-выставочный центр КФ АО «Апатит».

В рамках научной школы ведущими учеными ФИЦ КНЦ РАН — С. В. Федосеевым (д. э. н., директор Института экономических проблем им. Г. П. Лузина), Э. В. Каспарьяном (д. т. н., ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН), В. А. Маслобоевым (д. т. н., советник руководителя ФИЦ КНЦ РАН) — были прочитаны лекции, освещены вопросы оценки эффективности инвестиционных проектов при освоении комплексных месторождений, современные представления об условиях возникновения и методах предотвращения динамических разрушений в массивах горных пород, а также затронуты проблемы применения природоподобных технологий в Арктике.

Заслушано 42 доклада молодых ученых и специалистов по следующим научным направлениям: «Геомеханические проблемы безопасной отработки месторождений полезных ископаемых. Проблемы мониторинга природных и техногенных процессов при ведении горных работ»; «Геотехнология (открытая, подземная и строительная) — новые взгляды и подходы»; «Экологические проблемы освоения месторождений»; «Проблемы переработки минерального сырья, в том числе техногенного». Отмечено, что в большинстве заслушанных секционных докладов молодых ученых и специалистов отражены современные теоретические подходы и практические решения актуальных проблем.

В рамках школы-конференции сотрудниками ФИЦ КНЦ РАН, Санкт-Петербургского горного университета, Мурманского регионального инновационного бизнес-инкубатора проведены мастер-классы, способствующие повышению эффективности участия в инновационных проектах и публикации в высокорейтинговых англоязычных изданиях. Для молодых ученых и специалистов организован тренинг личностного и профессионального самоопределения.

Участники мероприятия посетили IX Международную конференцию «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее» — «Устойчивое развитие горнопромышленного комплекса Арктики на основе стратегического партнерства» в г. Кировске, прослушали пленарные доклады и приняли участие в работе секций, проводимых на производственных площадках (Расвумчоррский рудник, АНОФ-3) и на базе Музейно-выставочного центра КФ АО «Апатит».

IX Международная горная конференция «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее» (МГПК БЕАР 2019)
Кировск Мурманской области, 14–15 ноября 2019 г.

Конференция, ставшая главной отраслевой площадкой Северо-Запада России для проведения встреч и переговоров, демонстрации последних достижений техники и инженерной мысли в горной отрасли, не первый год проводится под патронатом Высшего горного совета НП «Горнопромышленники России» и при поддержке Правительства Мурманской области. В числе ее организаторов Кольский научный центр, Торгово-промышленная палата Российской Федерации (ТПП РФ) и Евро-Арктическая торговая палата Баренцева региона. Оператор мероприятия — Союз «Торгово-промышленная палата Мурманской области» (ТПП МО).

Всего в ее работе приняли участие более 400 специалистов из России, Финляндии, Норвегии, Германии, Дании, Голландии и Республики Беларусь.

Участники и гости МГПК БЕАР 2019 получили уникальную возможность встретиться и пообщаться с руководителями и ведущими специалистами зарубежных компаний БЕАР, крупнейших горнопромышленных компаний Кольского п-ова, входящих в промышленные группы «ФосАгро», «Акрон», «Северсталь» и «ЕвроХим».

Традиционно на площадке конференции отражаются значимые для предприятий ГПК Мурманской обл. даты. 2019 г. является юбилейным сразу для двух генеральных спонсоров конференции — Кировского филиала АО «Апатит» и АО «ОЛКОН». КФ АО «Апатит» накануне конференции отметил 90-летний юбилей, а Оленегорскому ГОКу в этом году исполнилось 70 лет.

Основная тема, которую обсуждали участники конференции в этом году, — устойчивое развитие горнопромышленного комплекса Арктики на основе стратегического партнерства.

Первый день работы завершился пленарной сессией «Роль горнопромышленного комплекса в развитии Мурманской области: Стратегия 2030» с участием заместителя губернатора Мурманской обл. О. А. Кузнецовой. В дискуссии также приняли участие руководители ведущих горных предприятий Мурманской обл. и вице-президент ТПП РФ.

В рамках МГПК БЕАР на протяжении двух дней работала экспозиция участников конференции, организованная ТПП Мурманской области. Продуктивно прошли встречи в формате B2B, также подготовленные специалистами ТПП МО.

15 ноября работа конференции продолжилась в секциях. Для участников секций «Пути повышения эффективности и безопасности горных работ» и «Современные тенденции повышения эффективности и экологической безопасности переработки минерального сырья» перед началом работы были организованы экскурсии на Расвумчоррский рудник и АНОФ-3.

Секция «Создание горного сервисного центра в рамках ТОСЭР Кировск. Биржа деловых контактов промышленного и строительного комплекса Мурманской области. Выбор лучших возможностей для их развития» работала в Кировском городском Дворце культуры.

Секция «Проблемы и перспективы обеспечения горнодобывающих предприятий инженерными кадрами» находилась в филиале МАГУ в г. Кировске.

Семинар в рамках проекта Россия Коларктик КО1030 SEESIMA «Улучшение экономических, экологических и социальных эффектов горной промышленности в регионе Коларктик»
ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», 20–21 ноября 2019 г.

Проект SEESIMA направлен на улучшение экологических, экономических и социальных эффектов горной промышленности в программном регионе Коларктик. Партнерами институтов ФИЦ КНЦ РАН (Институт проблем промышленной экологии Севера, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья, Горный институт) являются Северный научно-исследовательский институт Норут — Нарвик (Норвегия), Университет Оулу (Финляндия), Технический университет Лулео (Швеция).

Были представлены и обсуждены результаты первых 10 месяцев проекта КО1030 Программы сотрудничества и партнерства Коларктик SEESIMA. На совещании, организованном российским партнером проекта — ФИЦ КНЦ РАН, присутствовали 25 исследователей. Помимо ученых Кольского научного центра в рабочей встрече принимали участие исследователи из Северного исследовательского института (Норут — Нарвик, Норвегия), Университета Оулу (Финляндия) и Технического университета Лулео (Швеция).

Совещание открыла Г. А. Николаева, главный специалист отдела промышленного развития и сопровождения инвестиционных проектов Министерства инвестиций, развития предпринимательства и рыбного хозяйства Мурманской обл. В своей презентации она подчеркнула важную роль горнодобывающей промышленности в экономическом и социальном развитии Северо-Запада Российской Федерации.

На рабочей встрече были представлены следующие доклады:

1. Обзор энергосберегающих технологий сухого и мокрого измельчения и различных типов мешалочных мельниц.
2. Использование отходов горнодобывающей промышленности для производства строительных материалов.
3. Совершенствование технологических схем обогащения железных руд, в том числе схемы многостадийного извлечения концентрата.
4. Сорбция ионов тяжелых металлов из горных сточных вод органическими и неорганическими сорбентами и обращение с сорбционными материалами spet.
5. Микробное восстановление сульфата в сточных водах горнодобывающей промышленности.
6. Извлечение редкоземельных элементов из апатитовых/фосфатных концентратов, а также из хвостохранилищ с использованием новой техники и методов обращения с радионуклидами.
7. Получение функциональных соединений титана из апатит-нефелиновых отходов.
8. Разработка технологии флотации для извлечения меди и никеля из исторических хвостов.
9. Разработка геотехнических барьеров из отходов горной промышленности.

На второй день российские и зарубежные участники встречи посетили фабрику АНОФ-3 и Музейно-выставочный центр Кировского филиала АО «Апатит».

Международный семинар «Арктический туризм и морской мусор»
Мурманский морской биологический институт совместно с норвежской организацией «Акваплан-нива», Мурманским отделением Русского географического общества, Всемирным фондом дикой природы, Национальным парком «Русская Арктика», 26 ноября 2019 г.

Основной целью семинара стал обмен опытом экологов Норвегии и России по картированию прибрежных скоплений океанского мусора, привлечению волонтеров и туристов к очистке загрязненных территорий, а также обсуждение результатов действующих проектов по сохранению природы Арктики.

Площадкой для семинара стал информационный центр по атомной энергии г. Мурманска на борту атомного ледокола «Ленин». Организаторами выступили Мурманский морской биологический институт РАН, норвежская исследовательская компания «Акваплан-нива», Мурманское областное отделение Русского географического общества, Всемирный фонд дикой природы и Национальный парк «Русская Арктика». Все вышеперечисленные организации являются партнерами по финансируемому Научно-исследовательским советом Норвегии проекту Malinor.

Основную программу мероприятия составили 7 докладов представителей ММБИ КНЦ РАН, компании «Акваплан-нива», WWF, МАГУ, НП «Русская Арктика». На семинаре выступили представители ассоциации исследователей Арктики и туристических организаций Кольского Заполярья.

Семинар был организован в рамках темы-сателлита проекта Malinor «Арктический туризм в Баренцевом море — предупреждение и участие в предотвращении морского мусора». Суть научных работ заключается в картировании морского бытового мусора в норвежской и российской частях Арктики; кроме того, некоторые исследования направлены на решение проблемы сбора мусора (одно из предложений — привлечение к этой работе арктических туристов) и на предотвращение его проникновения в Арктику.

Между участниками разгорелась оживленная дискуссия о роли государства в очистке арктического побережья от мусора и регулировании туристических потоков: как найти баланс между развитием туризма в арктическом регионе и сохранить природу Арктики. Обсуждалась возможность участия туристов и волонтеров, в том числе молодежи, в программе по обнаружению и сбору бытового мусора на арктических побережьях, были затронуты механизмы и варианты привлечения их к этой работе.

Съезд регионального отделения Международного союза молодых ученых в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации
Санкт-Петербург, 19–22 октября 2019 г.

Идея создания Международного союза молодых ученых впервые была озвучена ректором Московского университета академиком В. А. Садовничим на XIX Всемирном фестивале молодежи и студентов в 2017 г. в городе Сочи. Студенты и молодые ученые с большим энтузиазмом восприняли эту инициативу.

В работе Съезда приняли участие представители, приехавшие из девяти регионов страны, — молодые доктора и кандидаты наук, сотрудники ведущих вузов и научных учреждений РАН Северо-Запада России.

Участники поделились опытом в создании и развитии взаимодействия интеллектуальной молодежи не только страны, но и мира.

Мурманскую область и Кольский научный центр РАН представляла делегация Совета молодых ученых и специалистов ФИЦ КНЦ РАН в составе: Е. Н. Козлова, к. г.-м. н., научного сотрудника Геологического института; А. В. Маслобоева, д. т. н., ведущего научного сотрудника Института информатики и математического моделирования; А. Н. Чапаргиной, к. э. н. старшего научного сотрудника Института экономических проблем им. Г. П. Лузина.

В деловой и культурной программе Съезда также приняли активное участие научные сотрудники Лаборатории медицинских и биологических технологий ФИЦ КНЦ РАН Екатерина Исакова, Мария Смирнова и Алена Койгерова.

Рабочая встреча по актуальным вопросам взаимодействия науки и промышленности
Малый конференц-зал Кольского научного центра, 13 ноября 2019 г.

Основной целью мероприятия была выработка механизмов внедрения научных открытий в промышленность, продуктивное взаимодействие между государством, инвесторами и учеными через структуры Торгово-промышленной палаты РФ.

Состав участников: *Маслобоев В. А*., д. т. н., советник председателя ФИЦ КНЦ РАН; *Лукичёв С. В*., д. т. н., директор Горного института ФИЦ КНЦ РАН; *Вержанский А. П*., д. т. н., генеральный директор НП «Горнопромышленники России», зав. кафедрой МГГУ, профессор; *Курочкин Д. Н*., вице-президент Торгово-промышленной палаты Российской Федерации; *Ильин А. Э*., вице-президент Торгово-промышленной палаты Мурманской обл.

Устойчивое развитие экономики невозможно без внедрения научных достижений, совершенствования технологий, обеспечения экологической безопасности. Институты, входящие в состав ФИЦ КНЦ РАН, обеспечивают высокий уровень фундаментальных и прикладных научных исследований, являясь крупнейшим многопрофильным научным центром на территории Арктической зоны Российской Федерации — стратегической ресурсной базы социально-экономического развития.

Участниками встречи была высказана идея о привлечении инвестиций не только от предприятий Мурманской обл., но и от широкого круга инвесторов из других субъектов РФ. Для этого было предложено при содействии Торгово-промышленной палаты организовать ряд встреч с инвесторами в регионах, где технологии Кольского научного центра наиболее востребованы.

Кроме того, обсуждались подходы к совершенствованию государственного регулирования инновационной деятельности и к внедрению научных разработок в промышленность, а также перспективы взаимодействия с оборонным комплексом, проблемы поиска государственных и частных инвестиций. По итогам встречи будет издан сборник материалов.

Мероприятие состоялось в преддверии IX Международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее», которая проходила в Кировске 14–15 ноября. ФИЦ КНЦ РАН и Торгово-промышленная палата — соорганизаторы данной конференции.

Бусырева, Е. В. **Судьбы финнов Мурманского региона: семейная история и культура :** монография / Е. В. Бусырева; под научной редакцией И. А. Разумовой. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 176 с.: ил. + Прил. (5 с.). **—** ISBN 978-5-91137-406-8.

Монография посвящена истории финских семей, которые волею судьбы оказались тесно связаны с Кольским Севером, большей частью в результате насильственных переселений первой половины XX в. В истории края финны занимают заметное место. Они были вовлечены в процессы освоения территории, способствовали ее культурному развитию. Их потомки, которые проживают на территории Мурманской обл., сохраняют память о финских корнях, несмотря на закономерные процессы ассимиляции. На материале устной семейной истории, домашних архивов и реликвий прослеживаются линии жизни семей с финской родословной на протяжении нескольких поколений, а также направления трансформации этнической культуры и причины восстановления этнической самоидентификации кольских финнов в конце XX — начале XXI вв.

Издание содержит иллюстративный материал, представленный фотографиями и документами из частных архивов.

Книга адресована этнографам, историкам, краеведам, культурологам, преподавателям и учащейся молодежи, а также всем, кто интересуется историей и культурой семей и народов Северо-Запада России.

Исследования арктических экосистем : материалы XXXVII Конференции молодых ученых ММБИ КНЦ РАН / ответственный редактор О. П. Калинка; Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН. **—** Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. **—** 101 с. — ISBN 978-5-91137-390-0.

Представлены материалы исследований молодых ученых ММБИ КНЦ РАН и их коллег из Мурманского арктического государственного университета и Мурманского государственного технического университета. Рассмотрены гидролого-гидрохимические процессы, осадконакопление, особенности распространения техногенных радионуклидов, видовой состав и распределение бентосных организмов, физиологические особенности бурых водорослей, отдельные аспекты поведения морских млекопитающих.

Козырев, С. А. **Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов** / С. А. Козырев, А. В. Осинцева, П. В. Амосов. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 114 с.: ил. — ISBN 978-5-91137-400-6.

В монографии представлены результаты исследований авторов по ряду актуальных вопросов рудничной аэрологии. Продемонстрировано авторское решение важной при проектировании горнодобывающих предприятий задачи — оптимизация размещения и параметров перемычек и вентиляторов в сети выработок с целью улучшения проветривания рабочих зон и уменьшения мощности, необходимой для организации проветривания всей вентиляционной системы. Предложен и реализован метод выбора параметров регуляторов и оптимизации их размещения, основанный на анализе взаимосвязи параметров сети и применении генетического алгоритма, который реализован в программном продукте VentCAD собственной разработки. По результатам натурных испытаний аэродинамики турбулентных воздушных потоков в тупиковых выработках и численного моделирования процесса выноса газообразных продуктов взрыва доказана возможность увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб с соблюдением нормативного времени на проветривание. Методами численного моделирования продемонстрированы возможности проветривания протяженных тупиковых выработок после взрывных работ за счет турбулентной диффузии, в том числе с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения. Ил. — 37, табл. — 22, библиогр. – 157 назв.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников, занимающихся вопросами рудничной аэрологии, и может быть использована в качестве пособия для аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Медико-биологические проблемы в Арктике : сборник тезисов I Всероссийской научно-практической конференции (Апатиты, 15–17 апреля 2019 г.). — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 75 с. — ISBN 978-5-91137-395-5.

В сборнике представлены результаты исследований по широкому спектру научно-исследовательских работ в области клинической и профилактической медицины, гигиены труда и окружающей среды, оценки здоровья человека при воздействии различных факторов в экстремальных условиях Арктики. Материалы опубликованы в авторской редакции.

Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника: сборник / редакторы В. Ш. Баркан, О. А. Макарова, Н. В. Поликарпова. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 227 с. — ISBN 978-5-91137-392-4.

Публикуются результаты научных исследований, выполненных в Лапландском заповеднике в последние годы. Приводится очерк о состоянии почвенного покрова и типах почв заповедника, аннотированные списки видов печеночников, листостебельных мхов и пауков заповедника, дается анализ многолетних данных о росомахе. Сборник включает серию статей об истории заповедника, подготовленных в разные годы его сотрудниками.

Книга адресована биологам, географам, экологам, краеведам, специалистам в области заповедного дела и охраны природы, всем интересующимся природой Мурманской области.

Труды XVI Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН / Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН. — 2019. — Вып. 16. — 681 с.

Научная программа Ферсмановской научной сессии включала трехдневную работу четырех секций, часть которых была проведена совместно с ЦНМ, ИХТРЭМС и ИППЭС КНЦ РАН: «Региональная геология, геофизика и полезные ископаемые», «Общая и генетическая минералогия», «Технологическая минералогия», «Геоэкология». Таким образом, получили дальнейшее развитие недавно восстановленные в ФИЦ КНЦ РАН принципы тесного сотрудничества научных подразделений, заложенные еще в прошлом столетии при его создании.

В очередной выпуск Трудов Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН вошло 136 статей.

XIX International Meeting on Crystal Chemistry, X-ray Diffraction and Spectroscopy of Minerals. Dedicated to the Memory of Academician E. S. Fedorov (1853–1919) : Book of Abstracts : [сборник тезисов] / под редакцией С. В. Кривовичева. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 237 с. — ISBN 978-5-91137-352-8.

В сборник включены тезисы докладов, представленных на XIX Международном совещании по кристаллохимии, рентгенографии и спектроскопии минералов, проходившем с 1 по 5 июля 2019 года в г. Апатиты (Кольский п-ов, Россия). В число основных тем докладов входят: теория и современные методы дифракционного и спектроскопического исследования минерального вещества и неорганических материалов; кристаллохимия неорганических соединений природного (минералы) и искусственного происхождения, включая материалы с интересными физико-химическими свойствами; неорганическое материаловедение (катодные материалы, протонные проводники, микропористые материалы и сорбенты, ионные проводники и т. д.); проблемы генезиса и свойств алмазов; описательная минералогия (новые минералы и новые находки минералов); прикладная минералогия (в связи с проблемами археологии и захоронения радиоактивных отходов); история кристаллографии. Издание предназначено для специалистов в области минералогии, кристаллографии, спектроскопии и материаловедения.

Фадеев, А. М. **Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике** : монография / А. М. Фадеев, А. Е. Череповицын, Ф. Д. Ларичкин. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 289 с.: ил. — ISBN 978-5-91137-407-5.

Проблемы стратегического управления нефтегазовым комплексом в Арктике — многокомпонентный процесс, который охватывает ряд важных проблем геополитического, экономического, общественного, природоохранного аспектов. Эти вопросы решаются на уровне государства и должны учитывать интересы прибрежных регионов, смежных отраслей и сервиса, интересы общества в части соблюдения экологических норм и создания новых рабочих мест. Каждая из этих задач требует своего методического подхода к стратегическому управлению. Кроме того, возникает необходимость понимания стратегического управления с точки зрения учета интересов всех стейкхолдеров при подготовке и реализации проектов по освоению морских нефтегазовых месторождений. В работе рассматриваются вопросы совершенствования экономических подходов к стратегическому управлению нефтегазовым комплексом в Арктике, развития новых сопряженных отраслей промышленности и эффективного природопользования, уделено значительное внимание менеджменту реализации проектов с учетом зарубежного опыта освоения природных ресурсов. Определенный интерес представляют положения монографии, связанные с вопросами взаимодействия государства и нефтегазового бизнеса, решение которых будет способствовать социально-экономическому развитию новых добывающих регионов в долгосрочной перспективе, а также обеспечению стратегических экономических интересов России в целом. Издание представляет интерес для студентов, аспирантов, преподавателей, а также для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием проблем освоения морских углеводородных месторождений Арктики.

Экологические проблемы северных регионов и пути их решения : тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения д-ра биол. наук, проф. В. В. Никонова (Апатиты, 16–22 июня 2019 г.) / редакторы Е. А. Боровичёв, О. И. Вандыш. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 468 с. — ISBN 978-5-91137-393-1.

Целью проведения VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения д-ра биол. наук, проф. В. В. Никонова, является обсуждение и поиск решений основных проблем функционирования арктических экосистем, их возможных трансформаций вследствие естественных и антропогенных воздействий.

В сборнике представлены 227 тезисов докладов, посвященных обсуждению проблем биоразнообразия северных экосистем, выявлению адаптивных механизмов и реакции экосистем на воздействие естественных и антропогенных факторов, моделированию и прогнозу трансформаций экосистем под воздействием этих факторов, оценке социально-экономических процессов в зонах интенсивного природопользования в Арктике, мониторингу воздействия на природную среду в арктических регионах и населенных пунктах с активной промышленной ресурсодобывающей деятельностью. Издание представляет интерес для научных работников разных специальностей, преподавателей вузов, учителей средней школы, а также студентов естественнонаучных и гуманитарных специальностей.

Вестник Кольского научного центра РАН. **—** Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. **—** № 3 (11). **—** 148 с.

Труды Кольского научного центра РАН. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — № 4 (10). — 136 с. (Прикладная экология Севера, вып. 7).

Труды Кольского научного центра РАН. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — № 8 (10). — 246 с. (Гелиогеофизика, вып. 5).

ВАСИЛЬЕВА Татьяна Николаевна

к. т. н., ученый секретарь Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН.

В 1987 г. с отличием окончила химический факультет Воронежского государственного университета по специальности «Химия» (специализация «Физическая химия») и начала трудовую деятельность в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья в лаборатории химических и оптических методов анализа в должности стажера-исследователя, пройдя всю карьерную цепочку от инженера до старшего научного сотрудника. С 2002 г. по настоящее время — ученый секретарь института. В период с 9 февраля 2015 г. по 8 февраля 2016 г. временно исполняла обязанности директора института.

В 1999 г. Татьяна Николаевна защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Процессы электрохимического окисления сульфидов в заскладированных горнопромышленных отходах и их влияние на окружающую среду и качество техногенных месторождений».

Специалист в области классического химического анализа веществ различного состава и современных физико-химических методов (атомно-абсорбционный с пламенной электротермической атомизацией, эмиссионный с индукционно-связанной плазмой, полярографический, спектральный, ионометрический). Принимала участие в разработке методов анализа минерального сырья Кольского п-ова и продуктов его переработки. Продолжает исследования по изучению гипергенных процессов в заскладированных горнопромышленных отходах. На основе анализа процессов окисления сульфидных минералов в составе хвостов обогащения медно-никелевых руд ею проведена оценка степени экологической опасности хранения сульфидсодержащих горнопромышленных отходов и тенденции изменения их технологических свойств как возможных техногенных месторождений. Впервые выполнены комплексные исследования процессов электрохимического окисления сульфидов в условиях, моделирующих хвостохранилища медно-никелевых месторождений, и предложены пути снижения экологической опасности хранения горнопромышленных отходов. Участвовала в исследованиях по применению магнезиально-силикатного реагента на основе серпентинита для извлечения тяжелых металлов из растворов различного генезиса.

В настоящее время как ученый секретарь выполняет большой объем работы, связанный с планированием научных исследований института, и осуществляет контроль за их выполнением. Возглавляет отдел научно-технической информации. Занималась также вопросами лицензирования и аккредитации образовательной деятельности института. Участвовала в организации и проведении всероссийских научных конференций с международным участием. Проявила себя ответственным и активным специалистом, пользуется уважением в коллективе.

Результаты научной деятельности отражены в 108 публикациях, в том числе в 1 монографии, 2 патентах, 32 статьях в рецензируемых журналах.

Награждена почетными грамотами РАН и Профсоюза работников РАН, Мурманской областной Думы, ФАНО России.

Поздравляем Татьяну Николаевну с юбилеем и желаем здоровья, неугасаемой энергии, дальнейших творческих успехов!

ЛОВЧИКОВ Александр Васильевич

д. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории № 27 Горного института ФИЦ КНЦ РАН.

После окончания в 1962 г. Ленинградского горного института поступил в аспирантуру Кольского филиала Академии наук СССР, затем прошел путь от младшего научного сотрудника до ведущего научного сотрудника. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1998 г. — докторскую.

Александр Васильевич — известный советский и российский ученый в области механики горных пород и обеспечения безопасности разработки удароопасных месторождений. За более чем 55-летний период им выполнен ряд разработок, направленных на научно-техническое обеспечение решения задач горной промышленности. Он принял участие в разработке общероссийских указаний по ведению горных работ на удароопасных месторождениях, является инициатором и лидером по обеспечению разработки Ловозерского удароопасного месторождения стратегического редкоземельного сырья.

С 1962 г. А. В. Ловчиков неизменно работает в Горном институте. За этот период неоднократно являлся руководителем и ответственным исполнителем научно-исследовательских работ по государственному заданию, в том числе оборонной тематики, контрактов с горнодобывающими предприятиями Мурманской обл., научных проектов Российского фонда фундаментальных исследований.

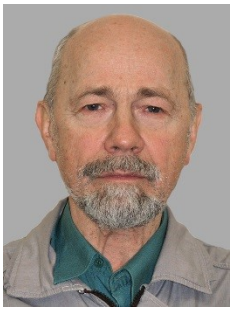
Александр Васильевич в течение более 40 лет — член постоянно действующей комиссии по горным ударам Ловозерского ГОКа, член ученого совета Горного института. На протяжении ряда лет входил в состав совета по присуждению ученой степени кандидата и доктора технических наук.

А. В. Ловчиков широко известен научной общественности благодаря выступлениям с докладами на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах и публикациям. Он автор 193 научно-технических статей и 4 книг по тематике разработки удароопасных месторождений.

В течение ряда лет Александр Васильевич занимался преподавательской деятельностью в вузах Мурманской обл., подготовил большое число высококвалифицированных горных инженеров, которые работают на горных предприятиях и в научно-исследовательских институтах.

А. В. Ловчиков имеет ряд поощрений, грамот, ведомственных наград: знаки «Шахтерская слава» II и III степени, «Горняцкая слава» II и III степени, медаль КНЦ РАН, Почетная грамота РАН.

От всей души поздравляем Александра Васильевича с юбилеем! Желаем хорошего здоровья, благополучия и новых творческих успехов на благо российской науки и отечества! Пусть Ваша жизнь будет наполнена уважением и поддержкой коллег, теплотой и любовью родных и близких. Пусть Вам всегда сопутствует удача!



ДАНИЛИН Аркадий Николаевич

к. т. н., заведующий лабораторией № 33 Центра физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН.

После окончания в 1967 г. Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) поступил на работу в Кольский филиал АН СССР. С 1990 г. — заведующий лабораторией электроэнергетики и электротехнологии. Член ученого совета ЦЭС КНЦ РАН.

Аркадий Николаевич — один из ведущих специалистов России в области проведения экспериментальных исследований в высоковольтной электроэнергетике и технике высоких напряжений. Под его руководством проводятся работы, направленные на обеспечение надежности систем передачи и преобразования электроэнергии в условиях Севера. В созданной им лаборатории, помимо научной, ведется активная научно-педагогическая деятельность, обеспечивающая высококвалифицированными кадрами как российскую науку, так и предприятия энергетической отрасли.

Научные интересы А. Н. Данилина находятся в области анализа электромагнитных нестационарных процессов в элементах высоковольтных сетей, надежности эксплуатации электроэнергетического оборудования, электромагнитной совместимости высоковольтных сетей и систем связи. В этих направлениях он был ответственным исполнителем хозяйственно-договорных НИР и разделов госбюджетных тем, участвовал в выполнении проектов, поддержанных грантами РФФИ. При его непосредственном участии были выполнены экспериментальные исследования изменения электрических характеристик грозозащитных разрядников в процессе длительной эксплуатации, разработана аналого-цифровая аппаратура для исследования перенапряжений в подстанционном оборудовании, усовершенствованы методы и алгоритмы расчета этих перенапряжений. Область компетенции — вопросы надежности и защиты электрических сетей высших классов напряжения, воздействие геомагнитных бурь на энергосистемы России, специальные методы высоковольтных испытаний электротехнического оборудования в условиях действующих подстанций; вопросы электромагнитной совместимости процессорной техники и источников мощных электромагнитных полей действующих подстанций. Результаты решений по данным проблемам вошли в доклады на конференциях, статьи и отчеты по бюджетной и хозяйственно-договорной тематике.

Кроме работы в лаборатории ЦФТПЭС ФИЦ КНЦ РАН, Аркадий Николаевич вел преподавательскую деятельность в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета (в настоящее время — МАГУ) и Апатитском филиале Мурманского государственного технического университета.

Им лично и в соавторстве опубликовано более 100 научных трудов, в том числе 5 патентов. Принимал непосредственное участие в руководстве и выполнении работ, результаты которых отмечены в отчетных докладах Президиума РАН.

А. Н Данилин — опытный руководитель, добросовестный, инициативный сотрудник, творчески относящийся к решению поставленных задач. В коллективе пользуется авторитетом и уважением.

Поздравляем Аркадия Николаевича с юбилеем и желаем здоровья, бодрости и дальнейших творческих успехов!

РАЕВСКИЙ Алексей Борисович

к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории геологии докембрия (№ 51) Геологического института ФИЦ КНЦ РАН.

После окончания в 1972 г. Воронежского государственного университета А. Б. Раевский служил офицером в Советской армии, а с 1974 г. начал трудовую деятельность в качестве инженера-геофизика Мурманской геолого-разведочной экспедиции. В этот период был выполнен большой объем региональных полевых геофизических наблюдений в центральной и восточной частях Кольского п-ова.

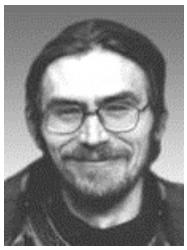
В 1976 г. он перешел на работу в лабораторию региональной геофизики Геологического института (тогда еще Кольского филиала АН СССР) на должность инженера и одновременно поступил в заочную аспирантуру. В 1980 г. переведен на должность младшего научного сотрудника. Кандидатскую диссертацию защитил в 1984 г. С 1989 г. работал в должности научного сотрудника, с 1999 г. был переведен на должность старшего научного сотрудника. С 2008 г. исполнял обязанности заведующего лабораторией региональной геофизики ГИ КНЦ РАН. В настоящее время — старший научный сотрудник лаборатории геологии докембрия ГИ КНЦ РАН.

Основное направление деятельности Алексея Борисовича составляет разработка теории и методики интерпретации геофизических полей. Им предложены и реализованы высокоэффективные алгоритмы, позволяющие решать широкий круг задач, возникающих при гравитационном моделировании строения земной коры и верхней мантии. А. Б. Раевский участвовал в крупных международных проектах по геофизическому изучению литосферы Балтийского щита: «Литосфера Центральной и Восточной Европы», «Глубинная геология Балтийского щита». В рамках комплексного геофизического изучения востока Балтийского щита Алексеем Борисовичем получены оригинальные результаты по трехмерному строению верхней коры Кольского региона, включая Имандра-Варзугскую и Печенгскую структуры, а также палеозойские щелочные интрузии. А. Б. Раевский занимается решением объемных задач геодинамики для коры Балтийского щита. Им внесен огромный вклад в интерпретацию морфологии гигантской колчановидной складки в Западных Кейвах. Уровень разработок, осуществляемых этим талантливым ученым, в целом соответствует передовым позициям в интерпретации геофизических полей.

По результатам исследований А. Б. Раевским опубликовано более 70 научных работ, многие из которых докладывались на крупных международных совещаниях. Работая доцентом в Кольском филиале Петрозаводского государственного госуниверситета, он внес весомый вклад в подготовку новых квалифицированных кадров.

Алексей Борисович Раевский пользуется большим уважением в коллективе Геологического института за принципиальность, высокие профессиональные качества, приверженность классическим методам работы и готовность оказать квалифицированную помощь в сложных математических и технических вопросах.

Поздравляем Алексея Борисовича с юбилеем и желаем здоровья, удачи в делах и новых творческих успехов!



ШЕВЦОВ Александр Николаевич

к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории геологии докембрия (№ 51) Геологического института ФИЦ КНЦ РАН.

В 1988 г. окончил физический факультет Ленинградского государственного университета и в том же году поступил на работу в Геологический институт Кольского филиала АН СССР на должность стажера-исследователя, затем последовательно занимал должности младшего научного сотрудника, научного сотрудника, с 2008 г. — старший научный сотрудник. В 2001 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита».

А. Н. Шевцов — специалист в области теории и практики глубинных электромагнитных зондирований земной коры. Основные результаты получены им в областях, связанных с измерением и математическим моделированием электромагнитных полей Земли, обработкой данных электромагнитных исследований, разработкой и развитием методов решения прямой и обратной задач электромагнитных зондирований земной коры. Он также активно занимался применением тензорного подхода в методах исследования земной коры с естественными и контролируемыми мощными источниками поля (с использованием ЛЭП), глубинными электромагнитными зондированиями мониторингом электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита.

А. Н. Шевцов — один из ведущих участников экспериментов по дистанционному электромагнитному зондированию в комплексе с частотными и аудиомагнитотеллурическими зондированиями, электропрофилированием на постоянном токе и др. Эксперименты «Ковдор — 2015», «Мурман — 2018», FENICS и многие другие проекты внесли значительный вклад в знания о природе земной коры и верхней мантии на территории Балтийского щита.

В составе творческого коллектива Александр Николаевич выполнил электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) в полях естественных и контролируемых источников. Результаты выполненных исследований показали перспективность применения комплексных электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируемыми источниками для изучения глубинного строения литосферы и прослеживания на глубине газонефтеперспективных горизонтов в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы на территории ЯНАО.

Научные достижения А. Н. Шевцова в составе коллектива неоднократно входили в перечень важнейших результатов исследований РАН. Он автор более 50 научных публикаций, большинство из которых напечатаны в высокорейтинговых российских журналах, помимо научной, ведет преподавательскую работу в Мурманском арктическом государственном университете.

Александр Николаевич пользуется большим уважением в коллективе Геологического института ФИЦ КНЦ РАН, всегда готов предложить необходимую помощь и дать консультации в сложных технических и математических вопросах.

Поздравляем Александра Николаевича с юбилеем и желаем здоровья, интересных научных открытий и творческих успехов!

КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 14

KOLA SCIENCE CENTRE
14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, RUSSIA

РИО
КНЦ
naukaprint.ru