



Федеральное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

В НОМЕРЕ:

- Теория проектирования и геотехнологические проблемы отработки месторождений полезных ископаемых
- Строительная геотехнология подземных и наземных сооружений
- Экологические проблемы горнопромышленного комплекса и природопользования
- Геомеханические и геодинамические процессы при освоении месторождений
- Геофизика

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ PROBLEMS OF SUBSOIL USE

ПОМНИМ! 1945-2025



80
ПОБЕДА!



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 2 (45)
2025

16+

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

№ государственной регистрации Эл № ФС77-56413 от 11.12.2013

Выходит 4 раза в год только в электронном виде

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.В. Корнилов, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – главный редактор
В.М. Аленичев, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – зам. главного редактора

Члены редакционной коллегии:

Н.Ю. Антонинова, к.т.н., заведующая лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.А. Абдурасулов, к.ф.-м.н., советник ректора, доцент, Таджикский технический университет имени академика
М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГГУ, г. Екатеринбург
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., заведующий отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН,
г. Москва
С.Е. Гавришев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой разработки полезных ископаемых, МГТУ им. Носова,
г. Магнитогорск
С.Ж. Галиев, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН РК, вице-президент АО «Казахстанский институт развития индустрии»
Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
А.В. Глебов, д.т.н., заместитель директора ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Ш.Ш. Заиров, д.т.н., проф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан
О.В. Зотеев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН
И. В. Зырянов, д.т.н., заведующий кафедрой горного дела политехнического института (филиал) СВФУ в г. Мирном
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва
К.Ч. Кожоголов, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН КР, директор Института геомеханики и освоения недр НАН КР,
г. Бишкек, Киргизская Республика
И.А. Козлова, к.г.-м. н, директор института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
И.Л. Кравчук, д.т.н. директор Челябинского Филиала института горного дела УрО РАН, г. Челябинск
М.В. Курления, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск
Ю.Г. Лаврикова, д.э.н., проф., директор Института экономики УрО РАН, г. Екатеринбург
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты
А.М. Макаров, д.т.н., проф., исполнительный директор ООО НИИОГР, г. Челябинск
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.Е. Пелевин д.т.н., проф. кафедры обогащения полезных ископаемых УГГУ, г. Екатеринбург
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск
Л.С. Рыбникова, д.т.н., с.н.с. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Д.И. Симисин, д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
И.В. Соколов, д.т.н., директор ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
С.М. Ткач, д.т.н., директор ИГДС СО РАН, г. Якутск
С.И. Фомин, д.т.н., проф. кафедры, НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург
Хадхуугийн Жаргалсайхан, д.т.н., директор Института горного дела Монгольского государственного университета
науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия
Л.С. Шамганова, д.т.н., член-корреспондент НАН РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Национальный центр по
комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
В.Л. Яковлев, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, советник РАН, ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

Все статьи проходят обязательное рецензирование

Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62

Сайт издания: trud.igduran.ru

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова

Уважаемые читатели журнала!

Предлагаем вам второй выпуск периодического издания «Проблемы недропользования» за 2025 год. К 80-летию победы Красной армии и советского народа над нацистской Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 годов в номере мы публикуем статью Л.М. Кулик и А.В. Глебова «Мы помним! Мы гордимся! Ветераны Института и родственники сотрудников в «Галерее памяти» ИГД УрО РАН». В статье показан многолетний опыт по сохранению памяти об ученых-горняках, воевавших на фронте и работавших в тылу, чтобы приблизить победу в Великой Отечественной войне. Представлен вклад работников Института горного дела УрО РАН в создание и развитие «Галереи памяти», состоящей из воспоминаний, фотографий, архивных сведений, сконцентрированных в альбомах, презентациях и публикациях, представленных на стендах.

Также в выпуске мы публикуем статьи, посвященные итогам XIX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования», которые не вошли в первый номер журнала. Исследованиям в данном направлении посвящен наш номер, который знакомит читателя с результатами работ молодых ученых в области теории проектирования, геотехнологических проблем отработки месторождений, геомеханических и геодинамических процессов при освоении месторождений, экологических проблем горнопромышленных комплексов и природопользования, обогащения полезных ископаемых, методов исследования.

Редколлегия

Содержание

Кулик Л.М., Глебов А.В. Мы помним! Мы гордимся! Ветераны Института и родственники сотрудников в «Галерее памяти» ИГД УрО РАН (к 80-летию Великой Победы)	5
---	---

ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Белкин П.А., Ушакова Е.С., Пугач В.В., Дробинина Е.В. Оценка потенциальных экологических рисков при долговременном складировании отходов промышленного производства соды	13
Сапунов А.О. Проектирование информационных моделей кустовых площадок	22

СТРОИТЕЛЬНАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ ПОДЗЕМНЫХ И НАЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Кирильчук М.С., Прохоров К.В., Золотов А.М. Применение стадийного дробления при гравитационном обогащении оловянных руд Солнечного ГОКа	38
Рассказова А.В., Самборская Т.С. Исследование вещественного состава отвальной забалансовой руды Малмыжского месторождения	51

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Дорошенко Е.М., Рассказова А.В., Драпей А.В. Методы снижения содержания вредных примесей в оловянных концентратах	60
---	----

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Романевич К.В., Мороз Н.Е., Иванов Д.А. Моделирование влияния сейсмособытий на напряженно-деформированное состояние массива горных пород при подземной разработке месторождений	69
Сердюк И.М., Евстигнеев Д.С. Разработка методики исследования ширины раскрытия и извилистости трещины в угольном керне по данным электронной микроскопии	80
Шевченко М.Д. Современные геофизические методы в изучении геомеханического состояния горного массива	87

ГЕОФИЗИКА

Бурцев Г.Е., Немирович-Данченко М.М. Определение первых вступлений на исходных 2D сейсмических данных при помощи полносвязной нейронной сети	96
Рукавишников Г.Д., Киряева Т.А. Особенности фоновых колебаний сейсмического датчика в условиях глубоких шахт и рудников	108

**МЫ ПОМНИМ! МЫ ГОРДИМСЯ!
ВETERАНЫ ИНСТИТУТА И РОДСТВЕННИКИ СОТРУДНИКОВ
В «ГАЛЕРЕЕ ПАМЯТИ» ИГД УрО РАН
(к 80-летию Великой Победы)**

Кулик Л.М., зав. научной библиотекой ИГД УрО РАН,

Глебов А.В., д-р техн. наук, зам. директора по научным вопросам ИГД УрО РАН

Сохранение исторической памяти о подвигах советского народа в годы Великой Отечественной войны – один из важных моментов в жизни каждого человека, неравнодушного к истории своей страны. Исторические факты, в особенности те, которые получены из первых уст, обязательно должны сохраняться и передаваться из поколения в поколение. Институт горного дела УрО РАН (далее – Институт) не исключение, в нем на протяжении многих лет ведется такая работа.

Если говорить об истоках, то Институт начал свою историю в предвоенные годы, когда Постановлением Президиума АН СССР (16 июня 1939 г., протокол № 19) было принято решение о создании в УФАН СССР Горно-геологического института (ГГИ УФАН СССР), включавшего три сектора: геологический, геофизический и *горный*. Директором был утвержден выдающийся ученый – горный инженер, академик Лев Дмитриевич Шевяков. В составе Горно-геологического института к концу 1939 г. было 26 научных сотрудников. Основным направлением исследований горного сектора (заведующий – д-р техн. наук, проф. Л.Н. Быков) было совершенствование систем разработки месторождений полезных ископаемых, борьба с пожарами на медноколчеданных рудниках и горное давление. Первоначально горный сектор включал две лаборатории: подземной разработки угольных месторождений (зав. лаб. И.Н. Сидоров) и подземной разработки рудных месторождений (зав. лаб. К.М. Чарквиани) [1].

С началом Великой Отечественной войны в 1941 г. в Свердловск были эвакуированы многие предприятия и организации. 16 июля 1941 г. вышло правительственное решение об эвакуации Академии наук СССР (АН СССР) из Москвы в крупные тыловые города. В октябре 1941 г. учреждения геологического профиля были эвакуированы на Урал, чуть позже из Москвы в Свердловск была перевезена часть Института горного дела АН СССР во главе с его директором – академиком А.А. Скочинским. Примерно в это же время из Казани на Урал перевезен Президиум Академии наук СССР [2].

Академики А.А. Скочинский и Л.Д. Шевяков в это время возглавили работу по мобилизации минеральных ресурсов [2]. В результате проведенных геологоразведочных работ, реконструкции действующих и строительства новых рудников, дробильных, промывочных, обогатительных и агломерационных фабрик с применением новой техники и технологии открытых и подземных горных работ к 1941 г. была создана надежная железорудная база черной металлургии на Урале и востоке страны.

Значительный вклад в победу над фашистской Германией труженики науки внесли в форме консультаций, которых только на Урале за 1942 г. провели свыше 1000. В этом же году директор института Л.Д. Шевяков получил государственную премию за книгу «О развитии народного хозяйства Урала в условиях войны» [3, 4].

В годы Великой Отечественной войны уральские горняки и металлурги сумели обеспечить промышленность необходимым количеством качественных железных руд и черных металлов [5]. Урал стал основным арсеналом страны по обеспечению фронта современной военной техникой и боеприпасами. Значительную роль в этом сыграли ученые АН СССР, в том числе работники горного сектора ГГИ УФАН СССР, преемником которого является нынешний ИГД УрО РАН.

Многие ученые и их родные стали непосредственными участниками тех героических событий, а не участвующие в боевых действиях вносили свой вклад в победу над фашизмом, будучи тружениками тыла. С момента окончания Великой Отечественной войны в ГГИ УФАН СССР началась работа по сохранению исторической памяти. Как и во всех организациях страны, в Институте был создан Совет ветеранов Великой Отечественной войны и труда. Проводились тематические встречи с ветеранами в дни празднования Великой Победы, велась работа по поддержке инвалидов и т.п.

Впоследствии ГГИ УФАН СССР был реорганизован, и в 1962 г. горный сектор выделен в самостоятельный институт – Институт горного дела в составе УФАН СССР, а в 1963 г. он был передан в подчинение Государственному комитету по черной и цветной металлургии, затем в ведение Министерства черной металлургии (МЧМ) СССР. Первым директором ИГД МЧМ СССР был утвержден Михаил Владимирович Васильев – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, который в течение 24 лет формировал основные научные направления деятельности и кадровую политику Института, особое внимание уделяя сохранению исторической памяти о подвиге советского народа и конкретных работниках Института.

К теме Великой Отечественной войны подходили всегда с большим уважением. События, произошедшие в годы войны, коснулись практически всех сотрудников и членов их семей. С каждым годом численность работников Института росла, увеличивалась работа по накоплению знаний о ветеранах и тружениках тыла. В 1967 г. в структуре Института был сформирован Отдел научно-технической информации (ОНТИ), которому совместно с Советом ветеранов Великой Отечественной войны и труда была поручена работа по сбору информации о фронтовиках, тружениках тыла и сохранению исторической памяти. Заведующим отдела был назначен Щепин Валентин Валентинович. Объективно это было всего 6 – 8 человек, заинтересованных инициативных работников, непосредственно участвующих в сражениях или трудившихся в тылу.

Началась целенаправленная работа по сбору информации об участниках боев, сражений и тружениках тыла, материала, который нужно было запомнить, сохранить и передать молодому поколению. В состав группы по сбору и оформлению материала входили сотрудники, которые сами были участниками военных событий или тружениками тыла в период 1941 – 1945 гг., и к теме сохранения исторических фактов они относились с особым вниманием.

В начале 70-х годов, будучи заведующим группой анализа и обобщения научно-технической информации (НТИ) ОНТИ, работу по сохранению исторической памяти возглавил Поторочин Анатолий Николаевич, который сам был фронтовиком. Он в 1940 г., после окончания средней школы, был призван в армию, во время боев 1944 г. в Заполярье тяжело ранен и уволен с воинской службы как инвалид войны. Дальнейшая жизнь А.Н. Поторочина была тесно связана с комсомольской, партийной и редакционной работой и получением высшего образования по специальности «Журналистика». С 1969 г. он работал в ИГД МЧМ СССР заведующим редакционно-издательским отделом, заведующим группой анализа и обобщения НТИ, старшим редактором ОНТИ до выхода на пенсию.

Определенный вклад в процесс накопления информации о фронтовиках внес Давыденко Андрей Иванович, также являвшийся фронтовиком и работавший в то время в ОНТИ. Он принимал участие в боях на Первом Украинском фронте в 22-й мотострелковой бригаде, будучи командиром взвода с сентября 1944 г. по май 1945 г. А.И. Давыденко был ранен, контужен, награжден медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.», многими юбилейными медалями. После демобилизации работал фотографом в УФАН СССР, затем в ИГД МЧМ СССР.

Сменив в 1981 г. предшественника на должности заведующего группой анализа и обобщения НТИ ОНТИ, работу по увековечиванию памяти о ветеранах и тружениках

тыла продолжил блокадник Воронин Виктор Борисович. Он в 1942 г. был эвакуирован на Урал из блокадного Ленинграда по «Дороге жизни» через Ладожское озеро, был ранен, потерял ногу. С 1992 по 1996 г. был председателем Екатеринбургского союза блокадников Ленинграда.

Пришедший в 1956 г. в Институт труженик тыла, к.т.н. Куклин Иван Сергеевич начал свою деятельность старшим научным сотрудником лаборатории гидромеханизации. Он не участвовал в боевых действиях, но в годы Великой Отечественной войны Иван Сергеевич, обучаясь в школе и в институте, работал в колхозах и совхозах. В 1948 г. окончил Свердловский горный институт, год работал на шахте им. Кирова треста «Егоршинуголь», затем окончил аспирантуру Свердловского горного института им. В.В. Вахрушева, практически сразу защитил кандидатскую диссертацию и в 1956 г. пришел работать в Институт. Долгое время он заведовал отделом разрушения горных пород, затем стал заместителем директора по научной работе. Был награжден орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», медалью в честь «30-летия победы в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 гг.» и другими почетными знаками, грамотами и благодарностями. На протяжении всей своей деятельности он принимал самое активное участие в процессе сохранения исторической памяти, лично рассказывал о военном времени, передавая знания молодым сотрудникам.

В 1985 г., в начале перестройки, Иван Сергеевич почти год исполнял обязанности директора Института.

С 1985 по 1992 г., в непростой период перестройки и перехода отрасли на хозяйственный расчет и самофинансирование, а затем в период начала становления рыночных отношений, руководство Институтom осуществлял к.т.н. А.А. Котяшев. В результате адаптации коллектива к новым экономическим условиям его основные задачи и структура в значительной мере изменились, поскольку доля отраслевого финансирования сократилась до 35 % от общего необходимого объема. К началу 90-х годов общая численность сотрудников Института достигла 505 человек, соответственно выросло и количество работников – фронтовиков и тружеников тыла.

Совет ветеранов Великой Отечественной войны и труда к 1987 г. состоял из 4 человек, а заведующим ОНТИ был назначен к.т.н. Павлов Александр Иванович.

К 1992 г. процесс политических и экономических изменений в стране привел к постепенному умиранию отраслевой науки, снижению объемов горного производства, Институт остался практически без средств к существованию. В этот тяжелый период директором Института стал к.т.н. Анатолий Дмитриевич Сашурин. Важным решением стало возвращение в Российскую академию наук (РАН). Уже в 1994 г. при поддержке администрации Свердловской области, Президиума УрО РАН и Президента РАН решением Правительства РФ Институт был введен в состав Уральского отделения РАН, а в 1995 г. директором Института стал член-корреспондент РАН Виктор Леонтьевич Яковлев, уже имевший к этому времени опыт руководства академическим институтом. При его непосредственном участии к 50-летию Победы в Институте была возобновлена работа Совета ветеранов во главе с И.С. Куклиным и разработано соответствующее Положение.

В Институте возродились и стали ежегодными торжественные встречи ветеранов и тружеников тыла (рис. 1). Проводились собрания, где рассказывали, как и чем Институт живет, о достижениях и планах на будущее. Затем организовывались дружеские застолья, которые давали возможность теплого дружеского общения поколения, прошедшего войну, с более молодыми сотрудниками Института. Было организовано шефство над ветеранами. Ветеранам и труженикам тыла оказывалась материальная помощь, никто из них не оставался без внимания.



Рис. 1. Ветераны Института с директором В.Л. Яковлевым

Накопленную более чем за 50-летний период информацию о сотрудниках Института – ветеранах Великой Отечественной войны и тружениках тыла – необходимо было сохранить и систематизировать, ни про кого нельзя было забыть. Собранные данные нашли свое место на стенде «Участники Великой Отечественной войны и трудового фронта 1941 – 1945 гг.» с фотографиями и фамилиями фронтовиков и тружеников тыла (рис. 2).



Рис. 2. Стенд «Участники Великой Отечественной войны и трудового фронта 1941 – 1945 гг.»

Более полная информация была сохранена и опубликована в альбоме «Все для фронта! Все для победы», в создание которого внес значительный вклад Стахеев Николай Лукич, в то время занимавший должность заместителя директора по экономическим вопросам. Он расширил информацию о каждом ветеране данными о службе, наградах, боевых заслугах, последующей деятельности в Институте.

Годы идут, уходит поколение, которое из первых уст передавало бесценную информацию о днях, прожитых в период 1941 – 1945 гг. Память о 31-ом фронтовике и 37-ми тружениках тыла отражена на почетных стендах в здании Института и альбоме,

хранящемся в научной библиотеке. Изменилась структура Института, сменились поколения, и теперь уже совсем другие работники подключились к процессу сохранения исторической памяти.

Воодушевленные примером «Бессмертного полка», в 2015 году, к 70-летию Победы, сотрудники научной библиотеки начали сбор материала о родственниках сотрудников, участниках боев и тружениках тыла. Сотрудники делились информацией о своих родных и близких, о том, кто кем работал, чем занимался, как по своим силам помогал фронту. Материала накопилось много. Уже в 2015 г. был собран материал о 45-ти родственниках сотрудников – прадедушках, дедушках и бабушках, матерях и отцах, просто наших близких и родных. Это новые знания о героях, чьими подвигами, боевыми и трудовыми, гордятся их потомки.

Масштабная работа по восстановлению и сохранению исторической памяти, проводимая по всей стране, затронула каждого. Работники Института стали приносить сохранившиеся о ветеранах данные. У кого-то просто фамилия, имя и отчество, где проходили службу, у других материала столько, что приходилось отбирать самое важное. С фотографиями и без, с документами и письмами. А как можно выбрать самое важное? Старались рассказать все о человеке, особенно интересны были фронтовые фотографии, награды, документы. В некоторых случаях приходилось использовать современные цифровые ресурсы, такие как «Память народа», «Подвиг народа», другие официальные сайты, благодаря которым находились документы, подтверждающие факты присуждения наград, места прохождения службы и многое другое. Собранный материал тщательно проверялся. На каждого оформлялся свой индивидуальный лист памяти. Итоги обработки согласовывались с работниками, предоставившими информацию. Весь этот объем работы инициативно выполнял один человек – заведующая научной библиотекой Кулик Людмила Михайловна.

Привлечение к процессу обработки ведущего графического дизайнера Института Петровой Татьяны Геннадьевны позволило оформить весь собранный материал в красивую, торжественную презентацию в стиле проекта «Бессмертный полк». В процессе оформления были объединены сведения о ветеранах, собранные за весь период существования Института. Первая демонстрация презентации состоялась 9 мая 2015 г. на торжественном общем собрании трудового коллектива Института, посвященном празднованию 70-летия Победы в Великой Отечественной войне (рис. 3).



Рис. 3. Празднование 75-летия Победы

Презентацию и материал о родственниках, оформленный и распечатанный на большеформатных листах, назвали «Лентой памяти», которая ежегодно обновляется на выставке научной библиотеки Института в период празднования Дня Победы.

Работа по вовлечению молодежи в процесс сохранения исторического наследия, привлечению нового материала от вновь поступающих сотрудников Института для «Ленты памяти» и презентации стала неотъемлемой частью трудовых функций работников научной библиотеки.

К 75-летию Победы в Великой Отечественной войне количество учтенных в «Ленте памяти» фронтовиков и ветеранов труда возросло до 55 человек (рис. 4, 5). «Лента памяти» содержит три раздела и посвящена памяти об участниках боев, тружениках тыла и о родных и близких. Сегодня, в год 80-летия Великой Победы над фашистской Германией, в ней содержатся сведения о 59-ти ветеранах Великой Отечественной войны и о тружениках тыла – родственниках сотрудников Института.



Рис. 4. Фрагменты «Ленты памяти» (электронная презентация)



Рис. 5. Фрагменты «Ленты памяти» (электронная презентация)

Таким образом, сформирована «Галерея памяти», состоящая из

- стенда, с которым с большим интересом знакомятся не только работники Института, но и наши гости, партнеры, друзья и коллеги;
- «Ленты памяти» (электронной презентации), периодически размещаемой на электронных ресурсах Института и демонстрируемой на общих собраниях трудового коллектива в присутствии ветеранов;
- альбома «Все для фронта! Все для победы» и бумажной версии «Ленты памяти», размещенных в научной библиотеке Института;
- научно-публицистических статей о вкладе ученых-горняков в победу в Великой Отечественной войне.

Работа с привлечением нового материала от вновь поступающих сотрудников Института будет продолжаться и в дальнейшем. «Галерея памяти» будет пополняться, бережно храниться и передаваться от поколения к поколению. Память о том тяжелом, но героическом периоде жизни для всей нашей страны сохранится в наших сердцах. Мы помним! Мы гордимся!



**ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 661.333:504

Белкин Павел Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
научно-исследовательская лаборатория
инженерно-экологических исследований,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет,
614068, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15
e-mail: belkin_pa@mail.ru

Ушакова Евгения Сергеевна

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
e-mail: ushakova.evgeniya@gmail.com

Пугач Владимир Владимирович

инженер,
научно-исследовательская лаборатория
технологической минералогии,
Естественнонаучный институт Пермского
государственного национального
исследовательского университета,
614068, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4
e-mail: vladimirpugach0@gmail.com

Дробинина Елена Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры динамической геологии и
гидрогеологии геологического факультета,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
e-mail: alenadrobina@yandex.ru

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ
ДОЛГОВРЕМЕННОМ СКЛАДИРОВАНИИ
ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА СОДЫ****Аннотация:*

Производство кальцинированной соды сопровождается образованием большого объема промышленных отходов. В статье приведен анализ воздействия хранилищ таких отходов на окружающую среду. Приведены результаты комплексного изучения состава осадков в заброшенном шламовом пруде на территории Пермского края. Вещественный состав осадков в высокой мере схож со шламами содового производства. Вместе с этим выявлены существенные вариации химического, минерального и гранулометрического состава осадков по глубине. Для подбора методов утилизации осадка требуется исследование изменчивости его свойств по всей площади пруда и адаптация ранее разработанных технологий обращения с отходами содового производства с учетом изменчивости свойств.

Ключевые слова: сырьевая база, химическая промышленность, кальцинированная сода, отходы производства, вторичное использование отходов.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.013

Belkin Pavel A.

Candidate of geological and mineralogical sciences,
Senior Researcher,
Research laboratory of engineering
and environmental surveys,
Perm State National Research University,
614068 Perm, 15 Bukireva Str.
e-mail: belkin_pa@mail.ru

Ushakova Eveniya S.

Candidate of geological and mineralogical sciences,
Junior Researcher, Research laboratory of engineering
and environmental surveys,
Perm State National Research University,
e-mail: ushakova.evgeniya@gmail.com

Pugach Vladimir V.

Engineer
of the research laboratory
of technological mineralogy,
Natural Science Institute
of Perm State National
Research University,
614068 Perm, 4 Genkel Str.
e-mail: vladimirpugach0@gmail.com

Drobinina Elena V.

Candidate of geological and mineralogical sciences,
Associate Professor, Department of dynamic
geology and hydrogeology,
Faculty of geology,
Perm State National Research University
e-mail: alenadrobina@yandex.ru

**ASSESSMENT OF POTENTIAL
ENVIRONMENTAL RISKS DURING
LONG-TERM STORAGE OF INDUSTRIAL
WASTE OF SODA PRODUCTION***Abstract:*

The production of soda ash is connected with the process of generation of a large volume of industrial waste. The article presents an analysis of the environmental effects of such waste storage facilities. The paper contains the results of a complex research of sediment composition in an abandoned sludge pond on the territory of Perm Krai. The material composition of the sludge is highly similar to the sludge from the soda production process. At the same time, significant variations of chemical, mineral and granulometric composition of sediments along the depth were revealed. Selection of sludge utilization methods requires a study of the variability of sludge properties over the entire pond area and adaptation of previously developed soda waste management technologies to account for the variability of properties.

Key words: raw material base, chemical industry, soda ash, production waste, waste recycling, waste utilization.

* Исследования проводились при финансовой поддержке и в рамках реализации проекта РНФ № 24-77-10062.

Введение

Кальцинированная сода является важной составляющей в нефтехимической и химической, стекольной, целлюлозно-бумажной промышленности, цветной и черной металлургии, горнодобывающей отрасли и в других отраслях. Карбонат натрия производится как синтетическим способом (в основном по аммиачно-содовой технологии Сольве), так и из натуральной соды, которая встречается в виде подземных рассолов, рапы в соляных озерах и минералов (трона ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), натрон ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), нахколит (NaHCO_3), термонатрит ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)) [1].

Месторождения троны имеют ограниченное распространение в земной коре. Они могут встречаться в ассоциации с боратами и другими солевыми отложениями. В глобальном масштабе выделяются четыре основные континентальные троновые провинции: в Анатолии (Турция), Вайоминге (США), Вученге (Китай) и Ботсване (юг Африки), которые связаны с щелочным вулканизмом, деятельностью термальных источников, закрытыми бассейнами и засушливым климатом [2].

Добыча природной соды в России осуществляется из единственного месторождения в Алтайском крае. Михайловское месторождение природной соды состоит из группы трех озер с балансовыми – 1668 тыс. т и забалансовыми запасами – 947 тыс. т. Данный участок находится в пользовании у ООО «Сибирская содовая компания» [3].

Мировым лидером производства кальцинированной соды в 2023 г. являлся Китай. Выработка соды здесь составила 29 млн т (преимущественно синтетической), далее – Турция и США (по 11 млн т в каждой стране). В России за этот период было произведено 3,274 млн т синтетической соды [4, 5].

Карбонатным сырьем для производства кальцинированной соды с использованием аммиачной технологии могут являться известняк или мел, причем первый предпочтительнее, поскольку мел является пористой породой и легко впитывает влагу, в результате чего нарушается нормальный ход обжига в известковых печах. В России наиболее крупные запасы карбонатного сырья сосредоточены в Себряковском месторождении мела в Волгоградской области, Новороссийском месторождении мергелей (Краснодарский край), Чаньвинском месторождении известняков (Пермский край), Боснинском месторождении доломитов (Северная Осетия), Ниланском месторождении известняков (Хабаровский край) и некоторых других [6].

Экологические аспекты производства кальцинированной соды

При производстве кальцинированной соды аммиачным способом образуется большое количество отходов. Так, на 1 т готового продукта приходится 9,5 – 10 м³ дистиллерной жидкости; 50 – 55 кг шлама в результате получения известкового молока; 0,1 – 0,15 м³ шлама в результате очистки рассола хлорида натрия. Отходы характеризуются высоким содержанием солей: минерализация водной вытяжки из шламов составляет от 1 до 39 г/кг. Высокое солесодержание обусловлено технологией производства и спецификой сырья. Так, на тонну готового продукта приходится около 1 т хлоридов, 400 кг кальция и порядка 200 кг натрия [7, 8].

Отходы производства (пульпу из шламов и дистиллерной жидкости) сбрасывают в специальные отстойники, называемые «белыми морями». Шламы оседают на дне отстойников, а осветленную дистиллерную жидкость сбрасывают в природные водоемы, что может приводить к росту минерализации в водоемах и вызывать существенное снижение биоразнообразия в них [9, 10].

За последние двадцать лет в Европе и Америке, в связи с экономическими, экологическими и социальными аспектами, уже закрылись или были реструктурированы предприятия по производству кальцинированной соды, являющиеся одной из самых экологически обременительных отраслей неорганической промышленности [11, 12]. На большей части предприятий содового производства, основанных в конце 19 – в начале 20 века, размещение отходов производства осуществлялось без изолирующего (непро-

нищаемого) слоя, следствием было выщелачивание хлоридных солей в грунтовые и поверхностные воды, как, например, засоление р. Вильга в районе от прудов-отстойников бывшего завода Сольве в Кракове (Польша) [13, 14].

Содовая промышленность в Прикамье

Старейшее в России производство соды по технологии Э. Сольве расположилось в Прикамье на левом берегу р. Камы в г. Березники. Выбор участка размещения производства, в первую очередь, был обусловлен наличием сырья: высококачественных известняков, рассолов хлорида натрия, получаемых из галитовых отходов, приуроченных к нижнепермским эвапоритам Пермского Прикамья, а также губахинского кокса и кизелевского угля.

На территории Пермского края балансовые запасы карбонатного сырья для химической промышленности категории А+В+С1 составляют 414,2 млн т, категории С2 – 21,6 тыс. т. с добычей в 2023 г. было 1551 тыс. т. для производства кальцинированной соды [15].

Получение рассолов для выработки соды по аммиачной технологии в Пермском регионе закономерно связано с Верхнекамским месторождением солей. Подземная добыча рассолов в Верхнекамском регионе началась еще в XV в. Левобережная часть г. Березники характеризуется наличием техногенных отложений и культурных слоев возрастом более чем 200 лет. В границах современной части камского левобережья располагалась большая часть старых соль-заводов и промыслов (Ленвенского, Дедюхинского, Зырянского, Березниковского). На их базе с 1883 г. и начинает работать Березниковский содовый завод [16]. Далее, в период советской индустриальной модернизации народного хозяйства, на месте бывших соль-заводов и старого содового производства быстрыми темпами был создан мощный индустриальный узел химической промышленности, включавший азотно-туковый завод им К. Ворошилова, Березниковскую ТЭЦ-4, новый содовый, анилино-красочный (химический) заводы [17].

Для Прикамского содового производства характерны типичные отраслевые экологические проблемы. За более чем вековой период промышленного производства здесь накоплены и складированы миллионы кубометров шламов. Специализированные шламонакопители в Березниках представлены действующим объектом площадью около 200 га, а также выведенным из производства накопителем площадью около 90 га. Следует отметить, что объекты содового производства в Пермском крае расположены в непосредственной близости от крупнейшего регионального водоема – Камского водохранилища. Учитывая высокую миграционную способность хлоридов – одного из главных компонентов шламов – такое расположение предъявляет особые требования к обеспечению безопасной эксплуатации накопителей отходов. В связи с этим техническое состояние специализированных хранилищ отходов является предметом пристального контроля хозяйствующих субъектов и органов государственного надзора.

Вместе с этим за пределами действующих промышленных предприятий расположен техногенный объект, созданный в советский период как резервный приемник промышленных стоков и временное хранилище отходов для близлежащих предприятий, в том числе содового завода. Этот техногенный объект представляет собой пруд площадью около 17 га, заполненный осадками сточных вод. Он был сформирован в устье р. Толыч после переноса русла реки и строительства ограждающей дамбы (рис. 1) в рамках защитных мероприятий при строительстве Камской ГЭС в пятидесятых годах прошлого столетия [18]. В настоящий момент водоем с накопленным осадком является бесхозяйственным, он расположен за пределами промышленных территорий. В него больше не осуществляется сброс сточных вод или промышленных отходов, однако вместе с этим не производятся его техническое обслуживание и контроль. Накопленные в пруде осадки могут представлять опасность для окружающей среды.

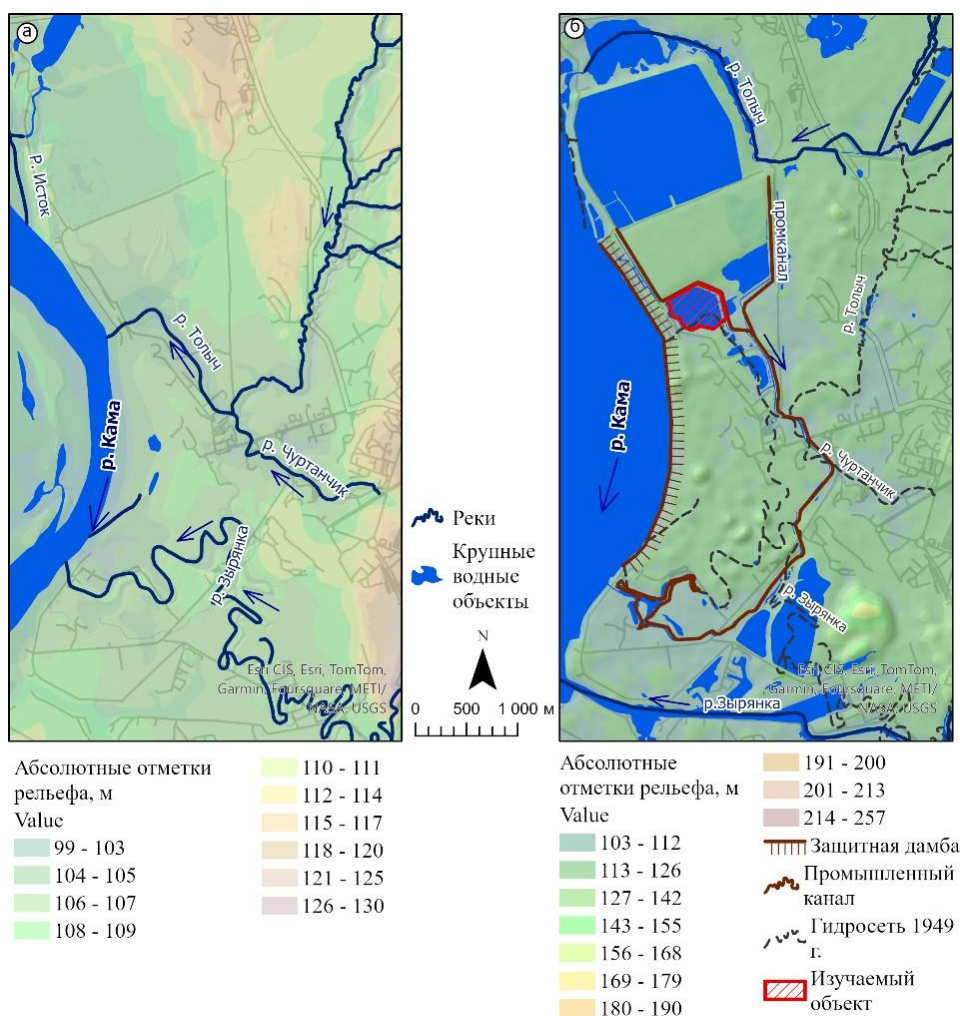


Рис. 1. Структура гидросети территории исследования до (а) и после (б) наполнения Камского водохранилища

Согласно действующему законодательству, в связи с нахождением техногенного объекта в пределах земель городского поселения, а также в границах водоохранной зоны, консервация отходов на месте невозможна. Кроме того, специфика накопленных отходов (соленая щелочная среда) не способствует разложению отходов при консервации объекта. В связи с этим рациональным способом ликвидации накопленных отходов является утилизация и переработка накопленных осадков. При этом в отличие от стационарных производственных объектов размещения отходов объект настоящего исследования характеризуется широким разнообразием стоков и отходов, которые попадали в него на протяжении десятков лет. В связи с этим первым шагом к решению вопроса переработки накопленных отходов является достоверное установление его морфологических особенностей и вещественного состава.

Теория, материалы и методы исследования

Для установления особенностей состава твердой части накопленного осадка (шлама), произведен отбор проб с целью исследований минерального состава и гранулометрической характеристики частиц. Отбор осуществлялся с использованием запатентованного керноотборника (RU2762631C1, дата регистрации 21 декабря 2021 г.) [19], позволяющего извлечь ненарушенный керн на полную мощность залегания осадка. В результате полевых работ удалось выделить и послойно описать отдельные слои накопленных шламов (рис. 2).

Описание осадка	Мощность слоя, м	Глубина подошвы, м	Колонка
Рыхлая паста кремового цвета	0,3	0,3	
Плотная, однородная паста белого цвета	0,3	0,6	
Паста серого цвета с нечеткими прослойками коричневого и красного цвета	0,3	0,9	
Плотная однородная паста светло-серого цвета	0,3	1,2	
Плотная однородная паста светло-серого цвета	0,4	1,6	
Плотная однородная паста темно-серого цвета	0,5	2,1	
Плотная однородная паста серого цвета	0,4	2,5	
Четкое разделение на слои черного, коричневого цвета через 1 см	0,2	2,7	
Белая паста с прослойками рыжего цвета	0,2	2,9	

Рис. 2. Описание слоев осадка по данным полевого обследования, 2024

В пробах каждого слоя осадка был проанализирован гранулометрический, минеральный и химический состав. Анализ минерального состава шлама был выполнен методом рентгеновской дифракции с применением рентгеновского порошкового дифрактометра D2 Phaser («Bruker»). Химический состав твердой фазы осадков определялся на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного типа действия S8 Tiger («Bruker»). Ситовый метод был использован для определения гранулометрического состава осадка.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате гранулометрического анализа было выявлено, что в большинстве слоев исследованной колонки преобладают мелкие частицы размерностью менее 0,1 мм. Исключение составляет третий от поверхности слой, преимущественно сложенный более крупными частицами (свыше 1 мм) (рис. 3).

Минеральный состав накопленных отходов характеризуется доминированием аутигенных карбонатных минералов, в первую очередь кальцита, а также доломита и соды. Вместе с ними в большинстве слоев широко распространены галит и гипс (см. рис. 3). Указанная минеральная ассоциация свидетельствует о происхождении осадка вследствие осаждения минеральной фазы из насыщенного рассола с высоким содержанием кальция и натрия. Наряду с широко распространенными аутигенными минералами

ми, в ряде слоев зафиксировано присутствие терригенных минеральных компонентов (глинистых минералов, полевых шпатов, кварца).

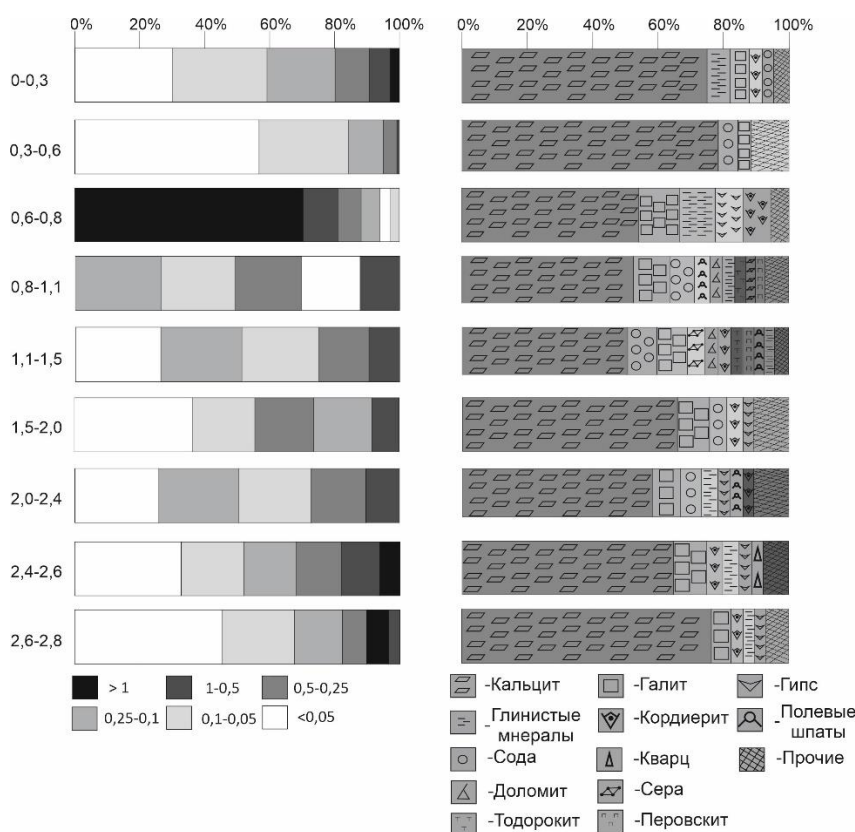


Рис. 3. Совмещенная диаграмма гранулометрического и химического состава осадка

Химический состав осадков, по данным РФА, характеризуется преобладанием во всех слоях оксида кальция. Массовое содержание СаО в слоях изменяется от 30 до 60 масс. %. Существенными компонентами химического состава осадков являются также оксиды магния (1,3 – 5,5 %), серы (2,3 – 4,3 %), железа (1,1 – 6,1 %), кремния (1,1 – 8,8 %) и хлор (6,9 – 10,6 %). Результаты изучения химического состава осадков в высокой степени коррелируют с установленными особенностями минерального состава образцов.

Заключение

Изученный пруд заполнен слоем осадка, мощность которого по исследованной колонке составила 2,8 м. Вещественный состав осадка, характеризующийся преобладанием тонкодисперсных карбонатов кальция и магния, в высокой мере схож со шламами, образующимися при использовании аммиачно-солевого способа производства соды. Состав осадков определяет основные риски взаимодействия отложений изученного пруда с окружающей средой. Главным образом, к ним относятся высокая соленость поровых рассолов с доминированием хлорид-анионов и щелочная pH, которые могут приводить к нарушению естественных гидрохимических условий. Указанные проблемы являются характерными для складирования отходов производства кальцинированной соды в регионах с гумидным типом климата.

Одним из мероприятий по снижению экологической нагрузки является исследование вещественного состава накопленных в бесхозных шламохранилищах отходов с целью последующей разработки рациональных способов их утилизации и переработки. В результате проведенных работ установлено, что в отличие от специализированных производственных шламонакопителей с гомогенным осадком, объект настоящего ис-

следования характеризуется слоистостью и неоднородностью состава отдельных слоев. Учитывая вышесказанное, для разработки методики рекультивации заброшенного шламохранилища требуется достоверное установление свойств осадка в плане и разрезе на всей площади пруда. С учетом изменчивости состава станут возможны подбор и адаптация методов утилизации осадка, в том числе на основе ранее разработанных методов технологий обращения с отходами содового производства.

Список литературы

1. Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А., 2018. Десульфатизация соды-сырца месторождения «Михайловское» Алтайского края. *Ползуновский вестник*, № 3, С. 116-119.
2. Helvacı C., Pirajno F., Ünlü T., Dönmez C., Şahin M. (eds). 2019. Turkish Trona Deposits: Geological Setting, Genesis and Overview of the Deposits. *Mineral Resources of Turkey. Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, Vol 16. Springer, Cham, 749 p.
3. Сибирская содовая компания. URL: <https://sibsoda.ru> (дата обращения: 31.01.2025).
4. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov> (дата обращения: 31.01.2025).
5. Березниковская содовая компания. URL: <https://www.bsz.ru/> (дата обращения: 31.01.2025).
6. *Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Карбонатные породы*. Москва: ФГУ ГКЗ, 2007, 37 с.
7. Блинов С.М., Меньшикова Е.А., 2019. Использование отходов предприятий Пермского края. *Вестник Пермского университета. Геология*, Т. 18, № 2. С. 179-191. DOI: 10.17072/psu.geol.18.2.179.
8. Красильникова С.А., Блинов С.М., Красильников П.А., Белкин П.А. 2021. Мировой опыт использования отходов производства соды. *Экология и промышленность России*. Т. 25, № 12. С. 48-53.
9. Худойбердиев Ф.И., Умиров Ф.Э., 2022. Изучение химических свойств дистиллерной жидкости – отхода производства кальцинированной соды. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, Т. 3, № 2, С. 4-8. DOI 10.24412/2181-144X-2022-2-4-8.
10. Mikheev P.B., Pankov N.N., Ushakova E.S., Baklanov M.A., Drobinina E.V., Puzik A.Yu., Volkova M.A., 2024. On the Criteria for the Assessment of the State of Polluted Freshwater Ecosystems with an Example of the Small River on the Eastern Edge of Europe (Perm Krai, Russia). *Pollution*, Vol. 11, No, P. 51-68. DOI: 10.22059/poll.2024.374565.2317.
11. Cichosz M., Kielkowska U., Skowron K., Kiedzik Ł., Łazarski S., Szkudlarek M., Kowalska B., Żurawski D., 2022. Changes in Synthetic Soda Ash Production and Its Consequences for the Environment. *Materials*, Vol. 15, P. 4828. DOI: 10.3390/ma15144828.
12. Effler S. W., Matthews D. A., 2003. Impacts of a Soda Ash Facility on Onondaga Lake and the Seneca River, NY. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 19, No. 4, P. 285-306. DOI: 10.1080/07438140309353940.
13. Likus-Cieślak J., Pietrzykowski M., 2021. The Influence of Sedimentation Ponds of the Former Soda “Solvay” Plant in Krakow on the Chemistry of the Wilga River. *Sustainability*, Vol. 13, P. 993. DOI: 10.3390/su13020993.
14. Strzebońska M., Kostka A., 2021. Geochemical State of Wilga River Environment in Kraków (Poland) – Historical Aspects and Existing Issues. *Minerals*, Vol. 11, P. 908. DOI: 10.3390/min11080908.
15. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2023 году». URL: <https://priroda.permkrai.ru> (дата обращения: 31.01.2025).

16. Ушакова Е.С., 2024. *Экогеохимия водных экосистем урбанизированных территорий Северного Прикамья*: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь: ПГНИУ, 187 с.
17. Сидорова И.Т., 2010. Становление химической промышленности в Верхнемкамье на примере Березниковского химического комбината. *Вестник государственного университета просвещения. Серия: История и политические науки*, № 2, С. 80-83.
18. Ушакова Е.С., Белкин П.А., Дробинина Е.В., 2023. Особенности осадкообразования и экологический статус промышленного канала сточных вод. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 334, № 6, С. 75-91.
19. Пат. 2762631 С1 Российская Федерация. *Способ отбора донных осадков для экологических исследований и устройство для его осуществления* / В.В. Ваганов, Р.Д. Перевощиков, Е.А. Меньшикова, Е.С. Ушакова; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет". № 2021118330, заявл. 21.06.2021; опубл. 21.12.2021., Бюл. № 36.

References

1. Ostrovskii Yu.V., Zabortsev G.M., Chernook V.A., 2018. Desul'fatizatsiya sody-syrtsa mestorozhdeniya "Mikhailovskoe" Altaiskogo kraia [Desulfatization of raw soda from the Mikhailovskoye deposit in the Altai Krai]. *Polzunovskii vestnik*, № 3, P. 116-119.
2. Helvacı C., Pirajno F., Ünlü T., Dönmez C., Şahin M. (eds). 2019. Turkish Trona Deposits: Geological Setting, Genesis and Overview of the Deposits. *Mineral Resources of Turkey. Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, Vol 16. Springer, Cham, 749 p.
3. Sibirskaya sodovaya kompaniya [Siberian soda company]. URL: <https://sibsoda.ru> (data obrashcheniya: 31.01.2025).
4. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov> (дата обращения: 31.01.2025).
5. Bereznikovskaya sodovaya kompaniya [Bereznikovskaya soda company]. URL: <https://www.bsz.ru/> (data obrashcheniya: 31.01.2025).
6. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznnykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh [Methodological recommendations for the implementation of the classification of storage and forecasting reserves of solid mineral resources. Karbonate ores]. *Karbonatnye porody*. Moscow: FGU GKZ, 2007, 37 p.
7. Blinov S.M., Men'shikova E.A., 2019. Ispol'zovanie otkhodov predpriyatii Permskogo kraia [Use of production facilities of Perm Krai]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, Vol. 18, № 2. P. 179-191. DOI: 10.17072/psu.geol.18.2.179.
8. Krasil'nikova S.A., Blinov S.M., Krasil'nikov P.A., Belkin P.A. 2021. Mirovoi opyt ispol'zovaniya otkhodov proizvodstva sody [World experience in the use of soda production waste]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. Vol. 25, № 12. P. 48-53.
9. Khudoiberdiev F.I., Umirov F.E., 2022. Izuchenie khimicheskikh svoystv distillernoi zhidkosti – otkhoda proizvodstva kal'tsinirovannoi sody [Study of chemical properties of distillery liquid – waste of calcined soda production]. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, Vol. 3, № 2, P. 4-8. DOI 10.24412/2181-144X-2022-2-4-8.
10. Mikheev P.B., Pankov N.N., Ushakova E.S., Baklanov M.A., Drobinina E.V., Puzik A.Yu., Volkova M.A., 2024. On the Criteria for the Assessment of the State of Polluted Freshwater Ecosystems with an Example of the Small River on the Eastern Edge of Europe (Perm Krai, Russia). *Pollution*, Vol. 11, No, P. 51-68. DOI: 10.22059/poll.2024.374565.2317.
11. Cichosz M., Kielkowska U., Skowron K., Kiedzik Ł., Łazarski S., Szkudlarek M., Kowalska B., Żurawski D., 2022. Changes in Synthetic Soda Ash Production and Its Consequences for the Environment. *Materials*, Vol. 15, P. 4828. DOI: 10.3390/ma15144828.

12. Effler S. W., Matthews D. A., 2003. Impacts of a Soda Ash Facility on Onondaga Lake and the Seneca River, NY. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 19, No. 4, P. 285-306. DOI: 10.1080/07438140309353940.
13. Likus-Ciešlik J., Pietrzykowski M., 2021. The Influence of Sedimentation Ponds of the Former Soda “Solvay” Plant in Krakow on the Chemistry of the Wilga River. *Sustainability*, Vol. 13, P. 993. DOI: 10.3390/su13020993.
14. Strzebońska M., Kostka A., 2021. Geochemical State of Wilga River Environment in Kraków (Poland) – Historical Aspects and Existing Issues. *Minerals*, Vol. 11, P. 908. DOI: 10.3390/min11080908.
15. Doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Permskogo kraya v 2023 godu" [Report "On the state and conditions of the surrounding environment of Perm Krai in 2023"]. URL: <https://priroda.permkrai.ru> (data obrashcheniya: 31.01.2025).
16. Ushakova E.S., 2024. Ekogeokhimiya vodnykh ekosistem urbanizirovannykh territorii Severnogo Prikam'ya [Ekogeochemics of water ecosystems urbanized territories of North Prikamy]: dis. ... kand. geol.-min. nauk. Perm': PGNIU, 187 p.
17. Sidorova I.T., 2010. Stanovlenie khimicheskoi promyshlennosti v Verkhnekam'e na primere Bereznikovskogo khimicheskogo kombinata [Setting up chemical industry in Verkhnekamsk on the example of Bereznikovsky chemical plant]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta prosveshcheniya. Seriya: Istoriya i politicheskie nauki*, № 2, P. 80-83.
18. Ushakova E.S., Belkin P.A., Drobinina E.V., 2023. Osobennosti osadkoobrazovaniya i ekologicheskii status promyshlennogo kanala stochnykh vod [Features of fallouts formation and ecological status of industrial wastewater canal]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 334, № 6, P. 75-91.
19. Pat. 2762631 S1 Rossiiskaya Federatsiya. Sposob otbora donnykh osadkov dlya ekologicheskikh issledovaniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of selecting bottom sediments for ecological research and designing them for their conservatio] / V.V. Vaganov, R.D. Perevoshchikov, E.A. Men'shikova, E.S. Ushakova; patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet". № 2021118330, zayavl. 21.06.2021; opubl. 21.12.2021., Byul. № 36.

УДК 622.276:004.942

Сапунов Анатолий Олегович

ТИМ-Мастер,

Томский научно-исследовательский и

проектный институт нефти и газа,

634027, г. Томск, пр. Мира, 72;

Томский государственный университет систем

управления и радиоэлектроники,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

e-mail: sanovta@yandex.ru**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
КУСТОВЫХ ПЛОЩАДОК***Аннотация:*

В данной обзорной статье рассматриваются современные подходы к проектированию кустовых площадок (КП) в нефтегазовой отрасли с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ). КП представляют собой ключевые объекты инфраструктуры добычи, транспорта и подготовки нефти и газа, а их проектирование требует значительных трудозатрат и высокой точности. В работе анализируется эволюция методов проектирования: от традиционных 2D-чертежей к трехмерному моделированию и дальнейшему переходу к информационному моделированию, объединяющему геометрические, технологические и эксплуатационные данные в единую цифровую модель.

Особое внимание уделяется этапам проектирования информационной модели КП, включая разработку схемы разбуривания скважин, формирование 3D-модели генерального плана, проектирование инженерных систем и автоматизированную генерацию документации. Рассматриваются инструменты проектирования, такие как САПР-платформы (nanoCAD, Компас и др.) и среды общих данных (CadLib Модель и Архив, Sarex и др.), обеспечивающие централизованное хранение информации.

Важным аспектом статьи является анализ возможностей повторного использования проектных решений, включая автоматизацию рутинных процессов. Приводятся примеры существующих методов автоматизации, таких как алгоритмы корректировки расположения КП и автоматическое формирование 3D-моделей. Отмечается, что, несмотря на потенциал автоматизации, ключевой проблемой остается учет нормативных требований при подборе проектных решений.

В заключении делается вывод о перспективности использования ТИМ в проектировании КП, об актуальности задач автоматизации производственных процессов, в частности об автоматизированном подборе проектных решений, а также дается оценка возможности его реализации.

Ключевые слова: кустовая площадка, нефтяное месторождение, информационное моделирование, ТИМ, BIM, 3D, САПР, автоматизация.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.022

Sapunov Anatoly O.

BIM-Master,

Tomsk Research and Design Institute

of Oil and Gas,

634027 Tomsk, 72 Mira Ave.;

Tomsk State University of Control Systems

and Radioelectronics,

634050 Tomsk, 40 Lenina Ave.

e-mail: sanovta@yandex.ru**DESIGNING INFORMATION MODELS
OF CLUSTER SITES***Abstract:*

This paper is a review article. It considers modern approaches to the design of well pads (WP) in the oil and gas industry using information modeling technologies (IMT). Well pads are key infrastructure facilities for the production, transportation and treatment of oil and gas, and their design requires significant labor costs and high accuracy. The paper analyzes the evolution of design methods: from traditional 2D drawings to 3D modeling and further transition to information modeling, which combines geometric, technological and operational data into a single digital model.

Particular attention is paid to the stages of designing a well pad information model, including the development of a well drilling scheme, the formation of a 3D model of the general plan, the design of engineering systems and automated generation of documentation. Design tools such as CAD platforms (nanoCAD, Compass, etc.) and common data environments (CadLib Model and Archive, Sarex, etc.) that provide centralized storage of information are considered.

An important aspect of this work is the analysis of the possibilities of reusing design solutions, including automation of routine processes. Examples of existing automation methods are given, such as algorithms for adjusting the location of the control point and automatic generation of 3D models. It is noted that despite the potential of automation, the key problem remains taking into account regulatory requirements when selecting design solutions.

As a result, a conclusion is made about the prospects of using TIM in the design of control points, about the relevance of the tasks of automating production processes, in particular about the automated selection of design solutions, and an assessment of the possibility of its implementation is given.

Key words: well pad, oil field, information modeling, TIM, BIM, 3D, CAD, automation.

Введение

Кустовая площадка (КП) относится к наземным объектам технологического комплекса добычи, сбора, транспорта и подготовки нефти и газа при обустройстве нефтяных и газовых месторождений [1].

Проектирование объектов обустройства месторождений – это длительный процесс, который требует значительных трудозатрат со стороны множества специалистов. Решения, принимаемые на этапе проектирования, имеют критическое значение для успешной разработки месторождения, влияя на его результативность и экономическую эффективность [2].

За время своего существования технология проектирования потерпела различные изменения, такие как внедрение в рабочие процессы формирования 2D-чертежей, переход от 2D-чертежей к формированию трехмерной модели, а также расширение трехмерной модели в информационную модель объекта [3].

Традиционно первичной стадией проектирования новой КП являлось создание общей технологической схемы, по которой разрабатывалась проектная и рабочая документация (от пояснительной записки до уточненной спецификации) [4]. Зависимость между технологической схемой и документацией можно считать как положительным явлением, так и отрицательным, т.к., с одной стороны, формирование информации на основе централизованных данных является удобным решением, а с другой стороны, при появлении правок по проекту (например, от заказчика), внесение изменений в технологическую схему требует внесения соответствующих изменений во всю документацию, что значительно увеличивает трудозатраты.

Следующим шагом был переход от формирования 2D-чертежей к формированию трехмерных моделей [5]. Внедрение технологий 3D-моделирования позволило повысить качество проектных решений, т.к. 3D-модель позволяла разглядеть объект проекта детально (рис. 1), оперативно внести корректировки, а также определить, на какой стадии произошла ошибка при возведении объекта [6].

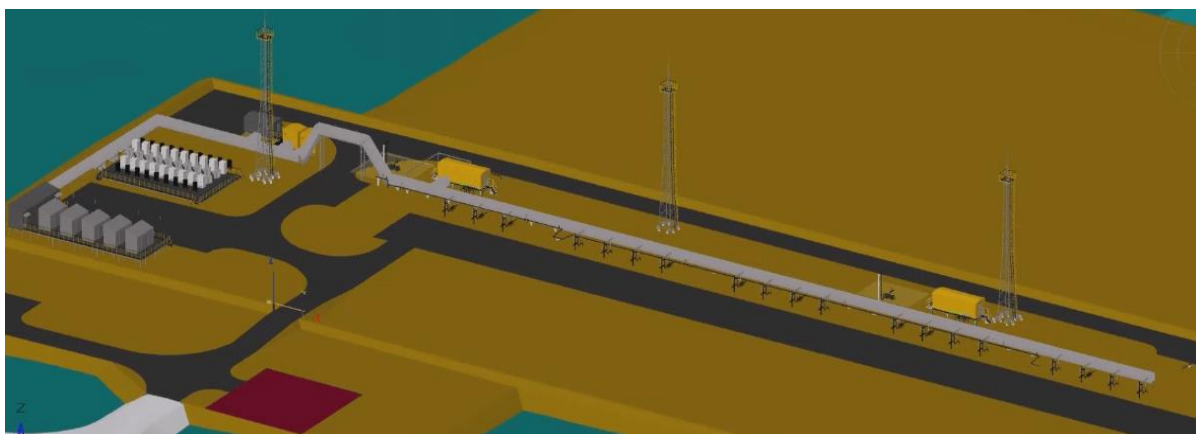


Рис. 1. Трехмерная модель КП

При всех достоинствах 3D-моделирования в задачах проектирования одного его было недостаточно, т.к., кроме информации о геометрии объекта, больше никакой информации оно не несет [7], в связи с чем (а также с целью достичь ключевых показателей экономической эффективности [8]) и возникло решение о расширении трехмерного моделирования в информационное (ИМ), а в 2018 г. обеспечить обязательное выполнение такого расширения было поручено Президентом РФ Правительству РФ [9].

В данном исследовании рассматриваются этапы проектирования информационной модели КП, информационное моделирование как явление, в также инструменты для формирования информационной модели. Особое внимание уделяется возможности

повторного использования проектных решений, в т.ч. автоматизации этого процесса, что является важным шагом на пути к повышению эффективности проектирования в нефтегазовой отрасли.

Основная часть

1. Понятие информационной модели

Информационная модель является совокупностью документов, материалов и сведений об объектах капитального строительства (ОКС) в электронном виде [10], т.е. технологические схемы, проектная и рабочая документация, трехмерная модель, а также многое другое было объединено в единое целое для того, чтобы обеспечить полноту информации о проектируемом объекте на всех стадиях его жизненного цикла.

Жизненный цикл ИМ – промежуток времени от начала инвестирования средств в реализацию проекта строительства (обустройства) до окончания эксплуатации объекта [11]. К фазам жизненного цикла ИМ ОКС принято относить

- 1) концептуальную фазу – формирование требований, задач, этапов работы, общей концепции;
- 2) фазу разработки проекта – формирование трехмерной модели, чертежей и документации;
- 3) фазу реализации проекта – строительство и монтаж объекта, проведение тестов перед вводом в эксплуатацию, проверку качества;
- 4) фазу эксплуатации – когда проект завершен и введен в использование; на данном этапе ведется активный мониторинг работы объекта, анализ эффективности, поддержка и другое.

На всех этапах жизненного цикла ИМ ОКС, зданий, строений или сооружений взаимодействуют различные организации: застройщики, технические заказчики, изыскательские организации, проектные компании, экспертизы, органы местного самоуправления, лица, осуществляющие строительство, государственный строительный надзор, службы эксплуатации, так или иначе участвующие в формировании и/или ведении ИМ [12, 13].

Для формирования ИМ используются технологии информационного моделирования (ТИМ в официальной строительной документации Российской Федерации или BIM за рубежом) объекта строительства, в результате которых должна быть создана его цифровая информационная модель (3D-модель) [14]. К составляющим ТИМ принято относить следующие виды моделирования [15]:

1. 3D-моделирование: создание трехмерной геометрической модели объекта.
2. 4D-моделирование: интеграция трехмерной модели с графиками строительно-монтажных работ (СМР), что позволяет визуализировать последовательность и продолжительность строительных операций.
3. 5D-моделирование: добавление к 4D-модели графиков поставок материалов и оборудования (МТР), обеспечивая контроль над материально-техническим обеспечением проекта.
4. 6D-моделирование: расширение 5D-модели путем включения финансовых планов, что позволяет анализировать инвестиционные затраты и управлять ими.

Таким образом, понятие информационной модели вмещает в себя много составляющих частей, насчет каждой из которых необходимо принимать те или иные проектные решения. Далее будут рассмотрены конкретные этапы проектирования ИМ КП.

2. Определение этапов проектирования ИМ КП

Прежде чем перейти к этапам проектирования, необходимо обозначить, из каких элементов состоит КП. К элементам КП относятся [16]

- 1) устьевые площадки скважин – из них газожидкостная смесь поступает на ИУ [17];

- 2) ИУ – получает со скважин смесь нефти, газа и воды, производит расчет их количества;
- 3) блок контроля и управления ИУ (БКРУ) – обеспечивает мониторинг и управление процессами в ИУ;
- 4) дренажная подземная емкость (ЕП) – собирает подземные воды для предотвращения загрязнения окружающей среды;
- 5) трубопроводная эстакада – по ней транспортируется газожидкостная смесь;
- 6) водовод высокого давления (ВД) – необходим для подачи воды на высоком давлении;
- 7) нефтегазосборный коллектор (НГС) – собирает и транспортирует нефть и газ;
- 8) низковольтные комплексные устройства (НКУ) – распределяют электроэнергию в низковольтных системах, необходимых для работы оборудования;
- 9) ТМПП и СУ – контроль и учет параметров технологических процессов;
- 10) комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – трансформируют электроэнергию, снижая напряжение до безопасного уровня;
- 11) прожекторные мачты – применяются для организации коммутационной связи и освещения КП [18];
- 12) кабельная эстакада – нужна для прокладки кабеля между оборудованием и коммуникациями.

В зависимости от типа КП на ней также могут размещаться блок дозирования реагентов, блок гребенки, различные насосы и станции управления насосами [19], дополнительные устройства, внедряемые точечно для измерения каких-либо характеристик, например количественных показателей воды [20], а также служебные и бытовые помещения [21].

Одним из важнейших этапов проектирования ИМ КП является разработка схемы разбуривания скважин на КП [22], которая содержит следующие сведения:

- количество скважин на КП (варьируется от 1 до 24 штук);
- расположение скважин на КП (в частности, расположение устья первой скважины, которое влияет на симметрию проектных устьев скважин) [23];
- распределение скважин по группам, в частности, определение количества скважин в первой группе;
- назначение и типы скважин: в основном используются добывающие и нагнетательные скважины, однако на практике встречаются и более редкие типы, такие как скважины в консервационном и пьезометрическом фондах, а также водозаборные скважины [24];
- интервалы между устьями скважин (расстояние в метрах)
- и др.

В зависимости от особенностей месторождения, на котором располагается проектируемая кустовая площадка, правила и процедуры формирования схемы разбуривания могут отличаться. Например, для некоторых месторождений характерно определять расстояние между скважинами в зависимости от их назначения [25]. Для других же, напротив, приняты конкретные интервалы между скважинами и группами скважин, и назначение скважин делается уже в зависимости от этих интервалов.

При наличии схемы разбуривания формируется трехмерная модель генерального плана (ГП) КП. Данный этап включает в себя формирование координатной сетки, а также земли проектируемого объекта. Помимо самой земли, в ГП моделируются откосы до поверхности, дороги, а также позиции (координаты и отметки высот) для сооружений и коммуникаций [26].

После сформированного ГП начинается проектирование трехмерной части модели: трубопроводные системы, технологическое оборудование, строительное оборудование, строительные конструкции, электрика, автоматика и т.д. Каждый элемент трехмерной модели, как и все его подэлементы собирается отдельно и наполняется

множеством атрибутов. Атрибутами в данном случае называются пара «Имя атрибута» и «Значение атрибута». Атрибуты несут в себе информацию разного рода. Какие-то из них отвечают только за графическую составляющую (габариты, цвет, материал), а какие-то делаются с целью правильно сформировать чертежи и документацию. Далее из готовой библиотеки элементов формируется итоговая 3D-модель.

Очень важно сформировать правильную трехмерную модель, т.к. низкое качество модели влечет за собой формирование чертежей с таким же качеством, что в свою очередь может привести к аварийным ситуациям на уже готовом объекте в будущем (например, прорыв трубопроводов или возникновение пожара на установках с напряжением [27]).

Как уже было отмечено, после того как завершаются работы над трехмерной моделью, заполненной атрибутами, на ее основании генерируются технологическая схема и документация. В большинстве случаев генерация происходит в автоматическом режиме, после чего результат подвергается ручной доработке.

В течение всех этапов проектирования ИМ все результаты и вся документация публикуются в среду общих данных.

3. Определение инструментов проектирования ИМ КП

При проектировании КП специалистами задействуются различные инструменты, помогающие обеспечить высокое качество проектируемого объекта [28]. Такие инструменты используются как на начальных этапах проектирования (формирование схемы разбуривания и заданий на проектирование), так и на всех последующих.

Важной особенностью инструментов разработки ИМ является возможность хранить результаты разных этапов работы над проектом в одном месте: общей базе данных проекта (или среде общих данных), где информация переходит из одного уровня в другой, существуя в системе долгое время [29]. Это важно, поскольку при формировании информационной модели нужно учитывать все зависимости между трехмерными моделями, 2D-чертежами и документацией.

К примерам среды общих данных относятся такие продукты, как CadLib Модель и Архив, Sarex, ЦУС и многие другие. Работа с ними открывает следующие возможности:

- 1) централизованное хранение данных со всех этапов работы над проектом;
- 2) привязку документации и 2D-чертежей к соответствующим трехмерным моделям [30];
- 3) проверку коллизий в 3D-модели путем штатных инструментов [31];
- 4) экспортирование сведений о проекте в различных форматах;
- 5) перекрестную работу над проектом множеством отделов.

Функционал подобного ПО многогранен и активно расширяется, что подтверждается необходимостью в разработке систем контекстной помощи пользователям [32].

Не менее важными являются инструменты САПР для формирования 2D-чертежей и трехмерных моделей: nanoCAD, вертикальное решение для nanoCAD - Model Studio CS, Компас, SprutCAM и другие, включая интеллектуальные САПР платформы [33].

Ключевыми особенностями САПР-платформ являются

- 1) возможность сформировать 2D-чертеж из уже созданной трехмерной модели;
- 2) возможность сформировать проектную документацию по созданным 2D-чертежам и трехмерной модели;
- 3) возможность автоматизировать те или иные процессы формирования ИМ;
- 4) возможность интегрировать среду общих данных в ПО, используя двусторонний доступ к данным на этапах проектирования ИМ (рис. 2);
- 5) возможность 4D-моделирования [34];

6) ориентированность на региональные нормы и стандарты проектирования строительных объектов;

7) возможность проектирования различных инженерных систем, а именно трубопроводы, вентиляцию, водоснабжение, канализацию, отопление и многое другое [35].

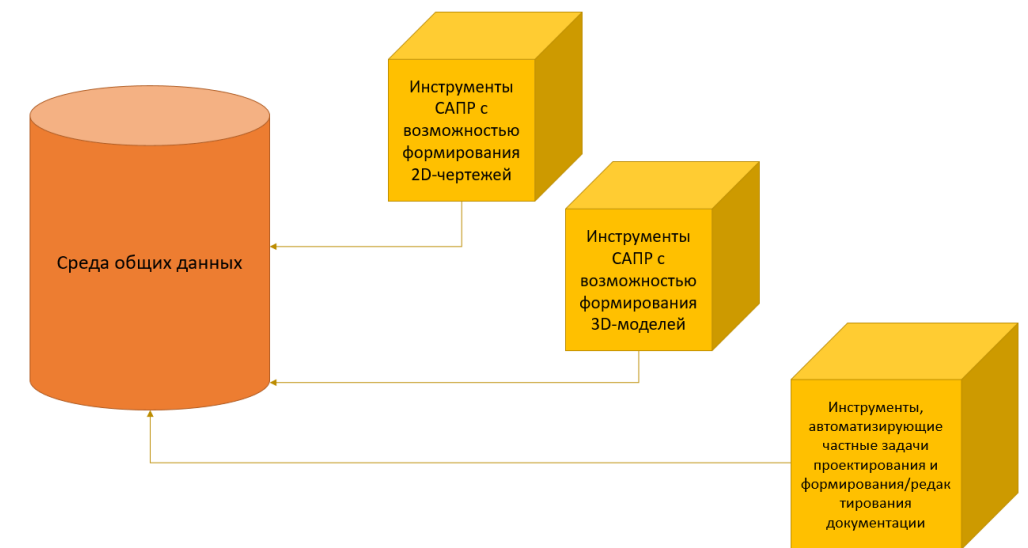


Рис. 2. Схема доступа к среде общих данных

Из перечисленных особенностей стоит подробнее рассказать про пункт 3, т.к. благодаря этой особенности функционал САПР-платформ может быть расширен многократно, а также нацелен на тонкости проектирования тех или иных строительных объектов.

Многие САПР-платформы предоставляют открытый программный интерфейс и библиотеки для возможности формирования пользователями своих надстроек над платформой. Это полезно, когда нужно автоматизировать расчеты для рутинных задач или унифицированные процессы, которые не меняются из проекта в проект. В случае формирования ИМ КП это особенно важно, т.к. большинство проектов данного типа содержат множество типизированных и унифицированных решений [36].

4. Повторное использование проектных решений при проектировании ИМ КП

Авторами научных исследований ранее проводились попытки автоматизировать различные процессы проектирования ИМ КП. Так, в работе [37] авторами предложен метод автоматизации работ по проекту организации строительства с получением календарного плана и графика финансирования. Авторами определены исходные данные к задаче, спроектирован проект объекта строительства, а также проведен пример расчета календарного плана и графика финансирования.

Кулаковым Е.Д. и др. предложен алгоритм корректировки положения кустовых площадок, который работает с проблемными кустами (когда нарушены допустимые значения скважин внутри куста и расстояния между кустами в целом) и их соседями [38].

Лакомых А.В., Клиценко Г.В. предложен подход к разработке проектной документации (концепция интерактивного проектирования (КИП)), основанный на принципах интерактивного взаимодействия расчетных модулей, контроле результатов, а также автоматическом обновлении текста в проекте [39]. Данный алгоритм упрощает разработку нефтяных месторождений.

Дидичин Д.Г. и др. предлагают инструмент по автоматическому формированию 3D модели КП проектов-образцов, т.е. проектов, отличия между которыми минимальные [40]. Поставленная идея охватывает автоматизацию большого объема работы, однако проходит она лишь по работе над КП конкретного месторождения (ООО «РН-Юганскнефтегаз»), а значит, не подходит под другие КП. Однако данный пример показывает, что этап формирования 3D-модели возможно автоматизировать в большом объеме.

Важно подметить, что, несмотря на возможность автоматизации большинства процессов проектирования ИМ КП, предварительные работы по разработке куста не всегда могут быть подвержены автоматизации. Так, Цыгляну П. пришел к выводу, что в отношении оптимальной геологической изученности залежей на стадии разведки и разработки месторождений в нефтегазовой отрасли отсутствуют конкретные требования, закрепленные на государственном уровне [41].

Утверждается, что корректность геофизических исследований скважины и полученных из них геологических данных напрямую зависит от погрешности прибора и типа промывочной жидкости в скважине, а сама погрешность может составлять до 50 % [42].

Повторное использование проектных решений является частным случаем автоматизации процессов проектирования. Вот как высказываются о данной задаче другие авторы:

- с начала 20-го века и до настоящего времени основным катализатором прогресса в области разработки и эксплуатации месторождений является ускорение обработки данных и обеспечение устойчивости решений за счет применения интеллектуальных технологий [43];
- применение автоматизированных технологий повторного использования проектных решений способствует тому, что компании могут принимать более взвешенные проектные решения, что уменьшает сроки разработки и улучшает качество проектируемых изделий [44];
- ключевым фактором для повышения эффективности использования систем автоматизированного проектирования (САПР) является сохранение и возможность многократного применения проектных решений. Это способствует уменьшению временных затрат на подготовку документации, преобразование данных и поиск информации об изделии [45].

Ранее уже проводились попытки автоматизировать технологии повторного использования проектных решений. Предложен метод подбора проектных решений на основе онтологической модели проектного решения САПР и запроса проектировщика [46, 47]. Суть метода заключается в том, что проектировщик задает класс изделия, выбирает какой-либо параметр выбранного изделия, указывает значение этого параметра, которое его интересует, задает отношение значения к параметру (больше, меньше, равно, не равно), после чего запускает поиск, результатом которого является перечень подходящих проектных решений. Данный подход упрощает работу проектировщика, однако не снижает возможность возникновения человеческого фактора, т.к. не учитывает государственную и локальную нормативную документацию.

Описан метод подбора проектных решений, суть которого заключается в формулировании нечетких команд на основе перечислительного и аналитического представления функций принадлежности [48]. Нечеткая команда формулируется на основе частично противоречивых условий, заданных функциями принадлежности. Данный подход позволяет находить проектные решения по заданному пользователем запросу, но так же, как и в предыдущей работе, в нем не учитываются нормативные стандарты. Однако, так как в методе присутствуют ограничения, связанные с такими факторами, как энергосбережение, теплоотведение и т.д., можно считать, что он имеет перспективы на расширение этих ограничений нормативной документацией.

Как можно заметить, зачастую при разработке методов подбора проектных решений специальная документация не учитывается, однако бывают и исключения. Так, предложена функциональная схема процесса проектирования стальных конструкций, с помощью которой можно реализовать программное решение по подбору проектных решений [49]. В схеме, помимо самих процессов, авторы также указали, какие строительные нормы и правила (СНиП) нужны этим процессам.

Предложена система, которая ориентирована на решение задач компоновки оборудования в отраслях промышленности [50]. Система имеет функционал для решения разных задач, в том числе и для подбора проектных решений при трассировании трубопровода, что очень важно на КП. Данная система содержит базу ограничений, которая состоит как из общих ограничений, так и из частных. Все ограничения, вносимые в базу, учитываются при подборе проектного решения.

Заключение

В процессе проведения литературного обзора были сформулированы следующие выводы:

1. Технологии информационного моделирования являются информативными, удобными и крайне полезными в задаче проектирования кустовых площадок.
2. Для разработки только одной информационной модели КП задействуются десятки людей, что указывает на высокий уровень проработки объекта, и потенциально – на его качество.
3. Автоматизация процессов проектирования информационных моделей комплексных производств представляет собой важную и актуальную задачу, что подчеркивает потенциальный спрос на автоматизированный подбор проектных решений.
4. Автоматизированный подбор проектных решений возможен благодаря унификации и типизации проектных решений для кустовых площадок.
5. Реализация автоматизированного подбора проектных решений представляется осуществимой задачей при учете существующих инструментов формирования информационных моделей, обладающих перспективами для дальнейшего расширения функциональности.
6. Зачастую при решении задачи повторного использования проектных решений авторами учитываются только параметры конкретных моделей, без проверки корректности данных параметров по отношению к регламентирующим документам.

Список литературы

1. Малышева Д.В., Малышев А.О., 2020. Обустройство кустовой площадки нефтепромысла. *Матрица научного познания*, № 12-2, С. 349-353.
2. Шайдуллин Р.Р., Воронков С.Е., 2022. Основные проблемы при проектировании разработки нефтяных и газовых месторождений и возможные пути их решения. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, № 4-1, С. 61-65.
3. Гуреев С.Н., 2017. Информационное моделирование в ПАО "Газпром нефть". *Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами (ЕРМІ-2017). Саратов, 18–21 сентября 2017 года*. Саратов: Издательство: ООО "ТПС Принт", С. 119-121.
4. Плесовских В.В., 2013. Моделирование кустов скважин в системах автоматизированного проектирования. *Новые технологии – нефтегазовому региону*. Тюмень: ТюмГНГУ, С. 333-334.
5. Гурьянов В.В., 2017. Информационное моделирование в нефтегазовой отрасли. Опыт проектного блока. *Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами (ЕРМІ-2017)*. Саратов: Издательство: ООО "ТПС Принт", С. 108-112.
6. Разяпов Р.В., Константиновский Г.А., 2020. Применение AR-инструментов при оценке технологии строительства кустовых площадок и автодорог на нефтепро-

мыслах. *Актуальные проблемы науки и техники*. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, С. 80-84.

7. Раховецкий Г.А., Коркишко А.Н., 2017. Информационная модель проекта – как основа оптимизации стоимости на всех стадиях реализации проектов обустройства, на примере компании «Газпром нефть». *Инженерный вестник Дона*, Т. 44, №. 1 (44), С. 56.

8. Абдулкадыров И.Х., 2017. Актуальные вопросы внедрения технологий информационного моделирования. *Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами (ЕРМИ-2017)*. Саратов: Издательство: ООО "ТПС Принт", С. 92-94.

9. Скуркан Е., Бредихин Д.А., Чайковская Л.В., 2024. BIM и ТИМ проектирование в РФ. *Технологии, машины, и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК*. Курск: Издательство ЗАО «Университетская книга», С. 294.

10. Гусарова А.А., 2023. План реализации проекта с ТИМ. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, № 5-2 (80), С. 79-83.

11. Иванов К.Д., 2017. Управление проектом и оценка рисков при обустройстве (строительстве) объектов эксплуатации кустовой площадки. *Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения*. Пенза: Наука и просвещение, С. 70-72.

12. Чуманов А.А., Кошкарлов А.А., 2023. Экспертиза информационных моделей с использованием комплексной системы ModelStudio CS. *Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве*. Екатеринбург: Уральский государственный архитектурно-художественный университет, С. 84.

13. Орельяна У.И.О., 2017. Создание информационной модели. Планирование и отслеживание календарного плана проекта. *Эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами (ЕРМИ-2017)*. Саратов: Издательство: ООО "ТПС Принт", С. 127-129.

14. Сайтов А.В., 2024. Опыт внедрения ТИМ в ПАО «НК «Роснефть» как ответ на современные вызовы цифровизации строительной отрасли. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, Т. 26, № 4, С. 199-210.

15. Субботин Д.В., 2023. Концепция внедрения информационно-строительного моделирования объектов в деятельность отечественных компаний. *Индустриальная экономика*, № 1, С. 109-116.

16. Нафиев Р.Ш., 2021. 3D моделирование архитектурно-строительных решений кустовой площадки на базе по Model Studio CS. *Избранные доклады 67-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. С. 217-219. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46641958&pff=1> (дата обращения 19.06.2025)

17. Петухов М.С., 2019. Разработка системы телесигнализации и управления кустовой площадки. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/54649?ysclid=mc368vv14r626489022> (дата обращения 19.06.2025)

18. Новоселов В.А., 2021. Автоматизация кустовой площадки. URL: <https://earchive.tpu.ru/jspui/handle/11683/67287?ysclid=mc36cgnhhs531512961> (дата обращения 19.06.2025)

19. Воробьев А.Е., Хоноре Т., Воробьев К.А., 2018. Цифровизация нефтяной промышленности: "интеллектуальный" нефтепромысел. *Вестник евразийской науки*, Т. 10, № 3, С. 71.

20. Самохвалов Н.С., 2020. Определение качества воды для нужд системы ППД. *Вестник магистратуры*, №. 2-6, С. 23.

21. Ибраев Р.Б., 2022. Разработка и исследование автоматизированной системы управления кустовой площадки добычи нефти. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/71556?ysclid=mc36gn9fyh348117030> (дата обращения 19.06.2025)

22. Капустин А.И., Мокрев А.А., Шакшин В.П., 2022. Оптимизация схем разбуривания кустовых площадок с использованием методов динамического программиро-

вания. *Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли*, С. 314-325.

23. Петров М.В. и др., 2019. Предпроектная техническая оценка возможности строительства скважин и оптимизация расположения кустовых площадок. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, № 1, С. 5-10.

24. Мулявин С.Ф., Бяков А.В., Нещадинов Р.А., 2023. Особенности разработки нефтегазоконденсатного месторождения Томской области. *Наука. Инновации. Технологии*, № 3, С. 137-156.

25. Валеев Д.Р., 2017. Оценка возможности автоматизации работы геологических служб нефтегазодобывающих предприятий путем разработки ПО на основе нечеткой логики. *International Journal of Advanced Studies*, Т. 7, № 1-2, С. 25-30.

26. Козлов И.А., Купреева Е.Н., 2016. Современные методы исполнительной съемки кустовых площадок на месторождении нефти. *Вклад молодых ученых в решение современных проблем геодезии, землеустройства и кадастра для обеспечения устойчивого развития экономики Прииртышья. Омск, 04-07 апреля 2016 года*, С. 86-89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wpgpkb&ysclid=mc8xwm0x5m134403647> (дата обращения 20.06.2025)

27. Долгих В.В., Майстренко Е.В., 2023. Обзор производственных факторов и аварийных ситуаций при нефтедобыче. *Безопасный Север – чистая Арктика. Сургут, 13-14 апреля 2023 года*, С. 108-110. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=bqcpao&ysclid=mc8y3gjqii247125467> (дата обращения 20.06.2025)

28. Суетин С.Н., Губайдуллин Д.В., Марченко Д.О., 2023. Теоретико-методологические аспекты применения современных технологий управления на предприятиях нефтяной и газовой промышленности. *Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право»*, Т. 33, № 1, С. 91-96.

29. Мухаррямов И.Р., 2024. Основные критерии выбора среды общих данных для работы проектных организаций. *Инженерный вестник Дона*, № 3 (111), С. 62.

30. Кудреватых О. А. и др., 2023. К вопросу о выборе программного обеспечения для создания BIM в инженерной геологии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, № 1, С. 283-296.

31. Воробьев С., Орельяна У.И., 2014. Информационная модель CADLib Модель и Архив: поиск коллизий на 3D-модели. *САПР и графика*, № 3, С. 45-49.

32. Пантелеев Е.Р., Мукучан А.А., 2023. Логическая модель построения пошаговой контекстной помощи пользователю САПР. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*, № 3, С. 68-78.

33. Родзин С.И., 2011. Организация параллельных эволюционных вычислений. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, Т. 120, № 7, С. 52-59.

34. Фахрутдинов А.Ю., Фетисов Л.В., 2024. Сравнение отечественного программного обеспечения по ТИМ-проектированию NanoCAD «инженерный BIM» и Model Studio CS. *Наука и образование сегодня*, № 2 (79), С. 11-13.

35. Янгиров Д.З., Латыпов В.М., 2024. Обоснование эффективности применения BIM-технологий на базе Model Studio CS. *Вестник науки*, Т. 3, № 5 (74), С. 1173-1176.

36. Васильев В.В. и др., 2020. Новые горизонты системы типового проектирования в ПАО «НК «Роснефть»: геология и разработка. *Экспозиция Нефть Газ*, № 5 (78), С. 12-15.

37. Зорин В.Д. и др., 2023. Методика автоматизации работ по проекту организации строительства с получением календарного плана и графика финансирования. *Инженерный вестник Дона*, № 2 (98), С. 611-621.

38. Кулаков Е.Д. и др., 2023. Алгоритм корректировки положения кустовых площадок при решении задачи разработки нефтяных месторождений. *Информатика и автоматизация*, Т. 22, № 2, С. 447-481.

39. Лакомых А.В., Клиценко Г.В., 2017. Концепция интерактивного проектирования. Новый подход к разработке проектной документации на строительство нефтяных и газовых скважин. *Булатовские чтения*, Т. 3, С. 138-144.
40. Дидичин Д.Г. и др., 2023. Новые инструменты ПАО «НК «Роснефть» для повышения эффективности проектирования: искусственный интеллект *Нефтяное хозяйство*, № 11, С. 50-55.
41. Цыгляну П., 2020. Обоснование требований к видам и объемам исследований при проектировании разработки мелких и очень мелких нефтяных месторождений. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, Т. 15, № 4, С. 37.
42. Тихонов А.С., 2019. Обзор состояния в области проектирования строительства нефтяных и газовых скважин. *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина*, Томск, 8-12 апреля 2019 г., Т. 2, С. 462-464.
43. Власов А.И., Можиль А.Ф., 2022. Обзор технологии: от цифрового к интеллектуальному месторождению. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*, № 3, С. 68-74.
44. Ларссон Я., 2014. Важность повторного использования проектных решений. *САПР и графика*, № 2, С. 70-73.
45. Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И., 2018. Методы и средства комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика. *Автоматизация процессов управления*, № 2, С. 50-57.
46. Войт Н. Н. и др., 2020. Разработка автоматизированной системы поиска проектных решений в библиотеке экземпляров проектных решений на базе онтологии. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, Т. 18, № 1, С. 17-26.
47. Войт Н. Н. и др., 2019. Концепция повторного использования в задачах автоматизации потоков работ проектных решений. *Информатика и вычислительная техника*, Ульяновск, 27-29 мая 2019 года. URL: <https://lib.ulstu.ru/venec/2020/10.pdf> (дата обращения 20.06.2025)
48. Чернышев Ю.О., Венцов Н.Н., Панасенко П.А., 2014. Алгоритм принятия проектных решений на основе нечетких команд. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, № 7 (156), С. 126-134.
49. Василькин А.А., 2016. Информационная технология автоматизации поддержки поиска проектных решений стальных конструкций. *Промышленное и гражданское строительство*, № 5, С. 76-80.
50. Егоров С.Я. и др., 2010. Автоматизированная информационная система поддержки проектных решений по компоновке промышленных объектов, часть 2. Структура и функционирование системы (Ч. 1, см. В ИТПП № 4, 2009 г.). *Информационные технологии в проектировании и производстве*, № 1, С. 33-39.

References

1. Malysheva D.V., Malyshev A.O., 2020. Obustroistvo kustovoi ploshchadki neftepromysla [Development of the cluster site of the oilfield]. *Matritsa nauchnogo poznaniya*, № 12-2, P. 349-353.
2. Shaidullin R.R., Voronkov S.E., 2022. Osnovnye problemy pri proektirovanii razrabotki neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii i vozmozhnye puti ikh resheniya [The main problems in the design of the development of oil and gas fields and their possible solutions]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, № 4-1, P. 61-65.
3. Gureev S.N., 2017. Informatsionnoe modelirovanie v PAO "Gazprom neft" [Information modeling in PJSC "Gazprom Neft"]. *Effektivnoe upravlenie kompleksnymi neftegazovymi proektami (EPMI-2017)*. Saratov, 18–21 sentyabrya 2017 goda. Saratov:

Izdatel'stvo: OOO "TPS Print", P 119-121.

4. Plesovskikh V.V., 2013. Modelirovanie kustov skvazhin v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya [Modeling of well pads in computer-aided design systems]. Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu. Tyumen': TyumGNGU, P. 333-334.

5. Gur'yanov V.V., 2017. Informatsionnoe modelirovanie v neftegazovoi otras-li. Opyt proektnogo bloka [Information modeling in the oil and gas industry. The experience of the project unit]. Effektivnoe upravlenie kompleksnymi neftegazovymi proektami (EPMI-2017). Saratov: Izdatel'stvo: OOO "TPS Print", P. 108-112.

6. Razyapov R.V., Konstantinovskii G.A., 2020. Primenenie AR-instrumentov pri otsenke tekhnologii stroitel'stva kustovykh ploshchadok i avtodorog na neftepromyslakh [The use of AR tools in evaluating the technology of construction of bush sites and highways in oil fields]. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. Izhevsk: Izhevskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni M.T. Kalashnikova, P. 80-84.

7. Rakhovetskii G.A., Korkishko A.N., 2017. Informatsionnaya model' proekta – kak osnova optimizatsii stoimosti na vsex stadiyakh realizatsii proektov obustroistva, na primere kompanii "Gazprom nef't" [Project information model is used as a basis for cost optimization at all stages of the construction project implementation, using the example of Gazprom Neft]. Inzhenernyi vestnik Dona, Vol. 44, №. 1 (44), P. 56.

8. Abdulkadyrov I.Kh., 2017. Aktual'nye voprosy vnedreniya tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya [Current issues of the introduction of information modeling technologies]. Effektivnoe upravlenie kompleksnymi neftegazovymi proektami (EPMI-2017). Saratov: Izdatel'stvo: OOO "TPS Print", P. 92-94.

9. Skurkan E., Bredikhin D.A., Chaikovskaya L.V., 2024. BIM i TIM proektirovanie v RF. Tekhnologii, mashiny, i oborudovanie dlya proektirovaniya, stroitel'stva ob'ektov APK [BIM and TIM design in the Russian Federation]. Kursk: Izdatel'stvo ZAO "Universitetskaya kniga", P. 294.

10. Gusarova A.A., 2023. Plan realizatsii proekta s TIM [Project implementation plan with TIM]. Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk, № 5-2 (80), P. 79-83.

11. Ivanov K.D., 2017. Upravlenie proektom i otsenka riskov pri obustroistve (stroitel'stve) ob'ektov ekspluatatsii kustovoi ploshchadki [Project management and risk assessment during the development (construction) of facilities for the operation of a bush site]. Nauka i innovatsii v XXI veke: aktual'nye voprosy, otkrytiya i dostizheniya. Penza: Nauka i prosveshchenie, P. 70-72.

12. Chumanov A.A., Koshkarov A.A., 2023. Ekspertiza informatsionnykh modelei s ispol'zovaniem kompleksnoi sistemy ModelStudio CS [Examination of information models using the integrated ModelStudio CS system]. Novye informatsionnye tekhnologii v arkhitekture i stroitel'stve. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi arkhitekturno-khudozhestvennyi universitet, P. 84.

13. Orel'yana U.I.O., 2017. Sozdanie informatsionnoi modeli. Planirovanie i otslezhivanie kalendar'nogo plana proekta [Creating an information model. Planning and tracking the project's calendar plan]. Effektivnoe upravlenie kompleksnymi neftegazovymi proektami (EPMI-2017). Saratov: Izdatel'stvo: OOO "TPS Print", P. 127-129.

14. Saitov A.V., 2024. Opyt vnedreniya TIM v PAO "NK "Rosneft" kak otvet na sovremennye vyzovy tsifrovizatsii stroitel'noi otrasli [Experience of implementing TIM in PJSC NC Rosneft as a response to modern challenges of digitalization of the construction industry]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, Vol. 26, № 4, P. 199-210.

15. Subbotin D.V., 2023. Kontseptsiya vnedreniya informatsionno-stroitel'nogo modelirovaniya ob'ektov v deyatelnost' otechestvennykh kompanii [Concept of introducing information and construction modeling of facilities in the activities of domestic companies]. Industrial'naya ekonomika, № 1, P. 109-116.

16. Nafiev R.Sh., 2021. 3D modelirovanie arkhitekturno-stroitel'nykh reshenii kustovoi ploshchadki na baze po Model Studio CS [3D modeling of architectural and construction solutions for a bush site based on Model Studio CS software]. Izbrannyye doklady 67-i Universitetskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh. P. 217-219. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46641958&pff=1> (data obrashcheniya 19.06.2025)
17. Petukhov M.S., 2019. Razrabotka sistemy telesignalizatsii i upravleniya kustovoi ploshchadki [Development of a telesignalization and management system for a cluster site]. URL: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/54649?ysclid=mc368vv14r6_26489022 (data obrashcheniya 19.06.2025)
18. Novoselov V.A., 2021. Avtomatizatsiya kustovoi ploshchadki [Automation of a cluster site]. URL: <https://earchive.tpu.ru/jspui/handle/11683/67287?ysclid=mc36cgnhhs531512961> (data obrashcheniya 19.06.2025)
19. Vorob'ev A.E., Khonore T., Vorob'ev K.A., 2018. Tsifrovizatsiya neftyanoi promyshlennosti: "intellektual'nyi" neftepromysel [Digitalization of the oil industry: an "intelligent" oilfield]. Vestnik evraziiskoi nauki, Vol. 10, № 3, P. 71.
20. Samokhvalov N.S., 2020. Opreделение kachestva vody dlya nuzhd sistemy PPD . [Determination of water quality for the needs of the PPD system]. Vestnik magistratury, №. 2-6, P. 23.
21. Ibraev R.B., 2022. Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannoi sistemy upravleniya kustovoi ploshchadki dobychi nefti [Development and research of an automated control system for an onshore oil production site]. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/71556?ysclid=mc36gn9fyh348117030> (data obrashcheniya 19.06.2025)
22. Kapustin A.I., Mokrev A.A., Shakshin V.P., 2022. Optimizatsiya skhem razburivaniya kustovykh ploshchadok s ispol'zovaniem metodov dinamicheskogo programmirovaniya [Optimization of drilling schemes for bush sites using dynamic programming methods]. Aktual'nye problemy neftegazovoi otrasli, P. 314-325.
23. Petrov M.V. i dr., 2019. Predproektnaya tekhnicheskaya otsenka vozmozhnosti stroitel'stva skvazhin i optimizatsiya raspolozheniya kustovykh ploshchadok [Predesign technical assessment of the feasibility of well construction and optimization of the location of well pads]. Stroitel'stvo neftyanikh i gazovykh skvazhin na sushe i na more, № 1, P. 5-10.
24. Mulyavin S.F., Byakov A.V., Neshchadimov R.A., 2023. Osobennosti razrabotki neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya Tomskoi oblasti [Features of the development of an oil and gas condensate field in the Tomsk region]. Nauka. Innovatsii. Tekhnologii, № 3, P. 137-156.
25. Valeev D.R., 2017. Otsenka vozmozhnosti avtomatizatsii raboty geologicheskikh sluzhbb neftegazodobyvayushchikh predpriyatii putem razrabotki PO na osnove nechetkoi logiki [Assessment of the possibility of automating the work of geological services of oil and gas producing enterprises by developing software based on fuzzy logic]. International Journal of Advanced Studies, Vol. 7, № 1-2, P. 25-30.
26. Kozlov I.A., Kupreeva E.N., 2016. Sovremennyye metody ispolnitel'noi s"emki kustovykh ploshchadok na mestorozhdenii nefti [Modern methods of performing survey of well pads at an oil field]. Vklad molodykh uchenykh v reshenie sovremennykh problem geodezii, zemleustroistva i kadastra dlya obespecheniya ustoychivogo razvitiya ekonomiki Priirtysh'ya. Omsk, 04-07 aprelya 2016 goda, P. 86-89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wpqpkb&ysclid=mc8xwm0x5m134403647> (data obrashcheniya 20.06.2025)
27. Dolgikh V.V., Maistrenko E.V., 2023. Obzor proizvodstvennykh faktorov i avariinykh situatsii pri neftedobyche [Review of production factors and emergency situations in oil production]. Bezopasnyi Sever – chistaya Arktika. Surgut, 13-14 aprelya 2023 goda, P. 108-110. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=bqcpao&ysclid=mc8y3gjqi247125467> (data obrashcheniya 20.06.2025)

28. Suetin S.N., Gubaidullin D.V., Marchenko D.O., 2023. Teoretiko-metodologicheskie aspekty primeneniya sovremennykh tekhnologii upravleniya na predpriyatiyakh neftyanoi i gazovoi promyshlennosti [Theoretical and methodological aspects of the application of modern management technologies in the oil and gas industry]. Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya "Ekonomika i pravo", Vol. 33, № 1, P. 91-96.
29. Mukhar'yamov I.R., 2024. Osnovnye kriterii vybora sredy obshchikh dannykh dlya raboty proektnykh organizatsii [The main criteria for choosing a common data environment for the work of project organizations]. Inzhenernyi vestnik Dona, № 3 (111), P. 62.
30. Kudrevatykh O. A. i dr., 2023. K voprosu o vybere programmnoho obespecheniya dlya sozdaniya BIM v inzhenernoi geologii [On the issue of choosing software for creating BIM in engineering geology]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle, № 1, P. 283-296.
31. Vorob'ev S., Orel'yana U.I., 2014. Informatsionnaya model' CADLib Model' i Arkhiv: poisk kollizii na 3D-modeli [CADLib Information Model and Archive: Search for collisions on a 3D model]. SAPR i grafika, № 3, P. 45-49.
32. Panteleev E.R., Mukuchyan A.A., 2023. Logicheskaya model' postroeniya poshago-voi kontekstnoi pomoshchi pol'zovatelyu SAPR [A logical model for building step-by-step contextual assistance to a CAD user]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta, № 3, P. 68-78.
33. Rodzin S.I., 2011. Organizatsiya parallel'nykh evolyutsionnykh vychislenii [Organization of parallel evolutionary calculations]. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, Vol. 120, № 7, P. 52-59.
34. Fakhrutdinov A.Yu., Fetisov L.V., 2024. Sravnenie otechestvennogo programmnogo obespecheniya po TIM-proektirovaniyu NanoCAD "inzhenernyi BIM" i Model Studio CS [Comparison of domestic software for team design nanoCAD "engineering BIM" and Model Studio CS]. Nauka i obrazovanie segodnya, № 2 (79), P. 11-13.
35. Yangirov D.Z., Latypov V.M., 2024. Obosnovanie effektivnosti primeneniya BIM-tekhnologii na baze Model Studio CS [Justification of the effectiveness of using BIM technologies based on Model Studio CS]. Vestnik nauki, Vol. 3, № 5 (74), P. 1173-1176.
36. Vasil'ev V.V. i dr., 2020. Novye gorizonty sistemy tipovogo proektirovaniya v PAO "NK "Rosneft": geologiya i razrabotka [New horizons of the standard design system in PJSC NK Rosneft: geology and development]. Ekspozitsiya Neft' Gaz, № 5 (78), P. 12-15.
37. Zorin V.D. i dr., 2023. Metodika avtomatizatsii rabot po projektu organizatsii stroitel'stva s polucheniem kalendar'nogo plana i grafika finansirovaniya [Methodology of automation of work on the design organization of construction with the receipt of a calendar plan and a graph of financing]. Inzhenernyi vestnik Dona, № 2 (98), P. 611-621.
38. Kulakov E.D. i dr., 2023. Algoritm korrektsii polozheniya kustovykh ploshchadok pri reshenii zadachi razrabotki neftyanykh mestorozhdenii [Algorithm for correcting the position of cluster sites when solving the problem of developing oil fields]. Informatika i avtomatizatsiya, Vol. 22, № 2, P. 447-481.
39. Lakomykh A.V., Klitsenko G.V., 2017. Kontseptsiya interaktivnogo proektirovaniya [The concept of interactive design]. Novyi podkhod k razrabotke proektnoi dokumentatsii na stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin. Bulatovskie chteniya, Vol. 3, P. 138-144.
40. Didichin D.G. i dr., 2023. Novye instrumenty PAO "NK "Rosneft" dlya povysheniya effektivnosti proektirovaniya: iskusstvennyi intellekt Neftyanoe khozyaistvo [New tools of PJSC NC Rosneft for improving design efficiency: Artificial Intelligence]. № 11, P. 50-55.
41. Tsyglyanu P., 2020. Obosnovanie trebovaniy k vidam i ob'emam issledovaniy pri proektirovanii razrabotki melkikh i ochen' melkikh neftyanykh mestorozhdenii [Substantiation of the requirements for the types and volumes of research in the design of the develop-

ment of small and very small oil fields]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, Vol. 15, № 4, P. 37.

42. Tikhonov A.S., 2019. Obzor sostoyaniya v oblasti proektirovaniya stroitel'stva neftyanykh i gazovykh skvazhin [Review of the state in the field of design of construction of oil and gas wells]. *Problemy geologii i osvoeniya neдр: trudy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Satpaeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K.V. Radugina*, Tomsk, 8-12 aprelya 2019 g., Vol. 2, P. 462-464.

43. Vlasov A.I., Mozhchil' A.F., 2022. Obzor tekhnologii: ot tsifrovogo k intellektual'nomu mestorozhdeniyu [Technology review: from digital to intelligent deposit]. *PRONEFT'. Professional'no o nefti*, № 3, P. 68-74.

44. Larsson Ya., 2014. Vazhnost' povtornogo ispol'zovaniya proektnykh reshenii [Importance of reusing project solutions]. *SAPR i grafika*, № 2, P. 70-73.

45. Afanas'ev A.N., Brigadnov S.I., 2018. Metody i sredstva kompleksnoi sistemy analiza proektnykh reshenii i obucheniya proektirovshchika [Methods and tools of a comprehensive system for analyzing design solutions and training designers]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*, № 2, P. 50-57.

46. Voit N.N. i dr., 2020. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy poiska proektnykh reshenii v biblioteke ekzemplarov proektnykh reshenii na baze ontologii [Development of an automated system for searching for design solutions in a library of copies of design solutions based on ontology]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, Vol. 18, № 1, P. 17-26.

47. Voit N.N. i dr., 2019. Kontseptsiya povtornogo ispol'zovaniya v zadachakh avtomatizatsii potokov rabot proektnykh reshenii [Concept of reuse in automation tasks of work flows of design solutions]. *Informatika i vychislitel'naya tekhnika*, Ul'yanovsk, 27-29 maya 2019 goda. URL: <https://lib.ulstu.ru/venec/2020/10.pdf> (data obrashcheniya 20.06.2025).

48. Chernyshev Yu.O., Ventsov N.N., Panasenko P.A., 2014. Algoritm prinyatiya proektnykh reshenii na osnove nechetkikh komand . [Algorithm for making design decisions based on fuzzy commands]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, № 7 (156), P. 126-134.

49. Vasil'kin A.A., 2016. Informatsionnaya tekhnologiya avtomatizatsii podderzhki poiska proektnykh reshenii stal'nykh konstruksii [Information technology for automating support for the search for design solutions for steel structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, № 5, P. 76-80.

50. Egorov S.Ya. i dr., 2010. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema podderzhki proektnykh reshenii po komponovke promyshlennykh ob'ektov, chast' 2. Struktura i funktsionirovanie sistemy (Ch. 1, sm. V ITPP № 4, 2009 g.) [Automated information system for supporting design decisions on the layout of industrial facilities part 2. The structure and functioning of the system (see Part 1 in ITPP No. 4, 2009)]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, № 1, P. 33-39.



**СТРОИТЕЛЬНАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
ПОДЗЕМНЫХ И НАЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

УДК 622.732

Кирильчук Максим Сергеевич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51;
младший научный сотрудник,
Тихоокеанский государственный университет,
680000, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136
e-mail: kirilchukm@mail.ru

Прохоров Константин Валерьевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: kostyan1986_ne@mail.ru

Золотов Алексей Маркович

лаборант,
Тихоокеанский государственный университет
e-mail: alexandro4695@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СТАДИАЛЬНОГО ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ОБОГАЩЕНИИ ОЛОВЯННЫХ РУД СОЛНЕЧНОГО ГОКА*

Аннотация:

Проведены исследования по стадияльному дроблению оловянной руды Солнечного ГОКа класса крупности $-5,0+0,0$ мм до класса $-0,2+0,0$ мм с целью выявления переизмельчения руды при дроблении в шламовый класс $-0,071+0,0$ мм. В работе сравнивалось применение конусной инерционной дробилки КИД-100 и дисковой мельницы Fritsch Pulverisette 13. Также дана сравнительная оценка между стадияльным дроблением и одностапным дроблением оловянной руды до класса $-0,2+0,0$ мм. В результате проведенных исследований было доказано преимущество стадияльного дробления перед одностапным: выход в класс $-0,071+0,0$ мм уменьшился с 79,3 до 58,3 %. Также была установлена разница при измельчении руды дробилками конусного типа и дисковыми мельницами. При измельчении оловянной руды фракции $-0,5+0,2$ мм с использованием дисковой мельницы по сравнению с конусной дробилкой уменьшился выход дробленой руды в класс $-0,071+0,0$ мм с 70,8 до 57,5 %.

Ключевые слова: олово, касситерит, оловянная руда, Солнечный ГОК, гравитационное обогащение, стадияльное дробление, конусная дробилка, дисковая мельница.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.038

Kirilchuk Maksim S.

Junior Researcher,
Mining Institute, Far East branch of RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.;
Junior Researcher, Pacific National University,
680000 Khabarovsk, 136 Tihookeanskaya Str.
e-mail: kirilchukm@mail.ru

Prokhorov Konstantin V.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, Mining Institute,
Far East branch of RAS,
e-mail: kostyan1986_ne@mail.ru

Zolotov Alexei M.

Laboratory assistant,
Pacific National University,
e-mail: alexandro4695@mail.ru

APPLICATION OF STAGE CRUSHING IN GRAVITY ENRICHMENT OF TIN ORES AT SOLNECHNY MINING PLANT

Abstract:

Research was carried out on the stage crushing of tin ore from Solnechny mining plant with a size class of $-5.0+0.0$ mm to a size class of $-0.2+0.0$ mm in order to identify overcrushing of the ore during crushing into a slurry size class of $-0.071+0.0$ mm. The work compares the use of a KID-100 cone inertial crusher and a Fritsch Pulverisette 13 disc mill. A comparative assessment is also given between stage crushing and single-stage crushing of tin ore to size class $-0.2+0.0$ mm. As a result of the conducted research, the advantage of stage crushing over single-stage crushing was proven: the yield in the $-0.071+0.0$ mm size class decreased from 79.3 to 58.3 %. The difference was also established when crushing ore with cone-type crushers and disk mills. When crushing tin ore of the $-0.5+0.2$ mm size class using a disk mill, compared to a cone-type crusher, the yield of crushed ore in the $-0.071+0.0$ mm size class decreased from 70.8 to 57.5 %.

Key words: tin, cassiterite, tin ore, Solnechny mining plant, gravity enrichment, stage breaking, cone-type crusher, disc mill.

* Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках ГЗ № FEME-2024-0006

Введение

В связи с ускоренным развитием техники и электронной промышленности производство олова за последнее десятилетие приобрело новые перспективы. Оловянная промышленность вошла в сферу государственных интересов во многих странах мира [1]. Исходя из таких условий востребованность российской сырьевой базы в 2,17 млн т олова (по данным 2017 г.), составляющей более четверти мировой, может значительно вырасти [2].

Основным минералом, имеющим промышленное значение при добыче олова, является касситерит. Содержание в нем олова достигает около 78,8 %. Высокая, относительно других составляющих, плотность касситерита делает его идеальным минералом для применения методов гравитационного обогащения. Обогащение оловянных руд осуществляется по сложным многостадийным гравитационно-флотационным схемам с использованием дополнительных методов обогащения [1, 3].

Для оловянных руд проблема определения диапазонов обогащения по крупности связана с природной вкрапленностью основных минералов олова в руде и их хрупкостью. В рудоподготовке оловосодержащих руд предъявляются два основных требования: максимальное раскрытие ценного компонента при минимальном переизмельчении руды и ее ошламовании. В практике обогащения оловянных руд одновременное соблюдение двух противоречивых по сути требований затруднительно, легко шламующийся касситерит плохо извлекается существующими методами обогащения, в том числе флотацией [4].

Анализируя общемировые исследования по гравитационному обогащению, можно сделать выводы о том, что все они сталкиваются с проблемой переизмельчения руды и указывают на сложность извлечения касситерита из шламового класса, а извлечение касситерита из основной части редко достигает 70 %. Например, в Индонезии, в частности на островах Риау и Банка, путем гравитационного обогащения и последующей магнитной сепарации удалось добиться извлечения касситерита в концентрат из скановых и окисленных руд 40 и 11,87 %, соответственно. [5] По результатам исследований египетских ученых по гравитационному обогащению отходов шахт Восточной пустыни с содержанием касситерита 0,19 % удалось сократить во фракции $-0,5+0,071$ мм размер исходной пробы в полтора раза с потерями в хвосты около 3 % от общего содержания касситерита [6]. Работы, проведенные на оловянной руде месторождения Фарин-Ламба, расположенного в Нигерии, показывают результаты в виде извлечения касситерита в районе 62 % из класса $-0,18+0,125$ мм, а также отмечают для данной фракции проблему переизмельчения материала в шламовую часть [7]. По результатам работы на пробах месторождения Уис в Намибии с исходным содержанием касситерита в районе 0,27 % извлечение при гравитационной схеме показало наивысший результат извлечения в районе 62 – 72 % в классе $-0,15+0,053$ мм [8].

Поэтому одной из основных задач интенсификации процесса гравитационного обогащения оловянных руд является уменьшение выхода тонкого класса при пробоподготовке.

В данной работе для снижения выхода дробленной руды в тонкий класс $-0,071+0,0$ мм при измельчении и подготовке оловянной руды для гравитационного обогащения были проведены исследования по стадийному дроблению.

В работе исследовался рудный материал Солнечного горно-обогатительного комбината. Проба представлена обломками темно-серого цвета различной величины от песчаных зерен до 10 – 15 см по удлинению.

Солнечное касситерит-силикатно-сульфидное месторождение – одно из главных в Комсомольском оловорудном районе, расположенном в центральной части Хинган-Охотского металлогенического пояса. Минеральный состав руд характеризуется

преобладающими количествами кварца, сопровождаемого полевыми шпатами, светлыми слюдами, топазом, турмалином. Рудные минералы – касситерит, вольфрамит, шеллит, молибденит, висмутин и самородный висмут, халькопирит, станнин, арсенопирит, галенит. Касситерит, вольфрамит, молибденит и галенит содержат редкие металлы (скандий, индий, рений, кадмий) [9].

Детальные разработки института ЦНИИОлово для многосульфидных оловянных руд месторождения Фестивальное Хабаровского края, которые также составляют основу исходной руды на складах Солнечного ГОКа, показали, что при переработке их флотационно-гравитационной схемой обогащения обеспечивается получение оловянного и медно-висмутитового концентратов с извлечением олова на уровне 60 – 65 % от руды. В то же время при переработке этих руд в промышленных условиях по гравитационно-флотационной схеме извлечение олова не превышает 50 %. Это объясняется в основном тесной ассоциацией касситерита с сульфидными минералами и, следовательно, со значительными потерями олова при доводке черновых концентратов [10].

Материалы и методы исследования

Пробоподготовка до класса $-5,0+0,0$ мм осуществлялась с использованием щековой дробилки ДЛЩ и щековой дробилки Fritsch Pulverisette 1 по схеме стадийного дробления (рис. 1).

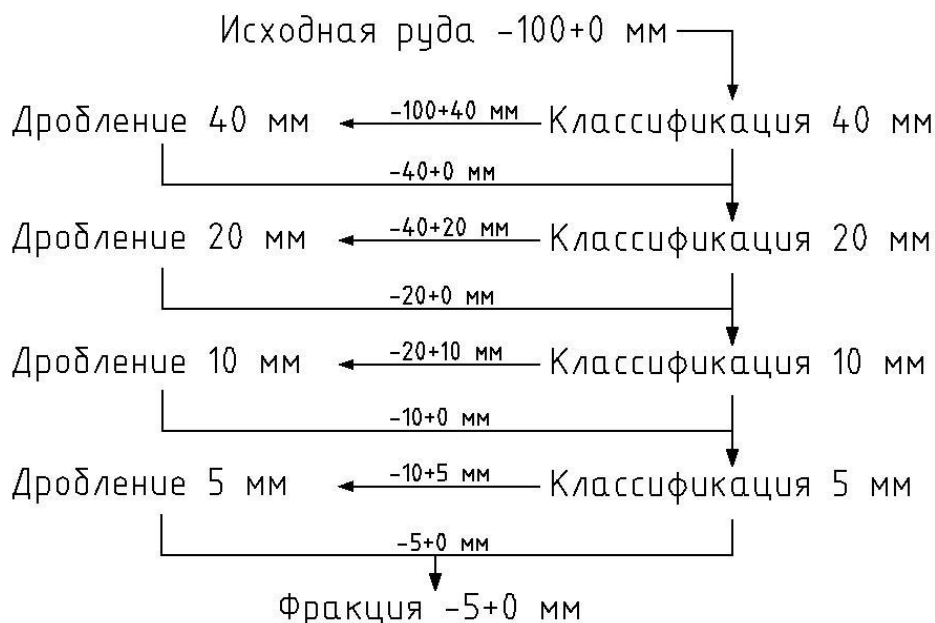


Рис. 1. Пробоподготовка исходной оловянной руды

Минералогические исследования выполнялись с использованием бинокляров Stemi 2000, Stereo Discovery V8 (ZEISS), а также сканирующего электронного микроскопа JEOL «JCM-6000 PLUS». Исследования по гравитационному обогащению производились на концентрационном столе СКЛ-2. Качественный анализ исходных материалов и промпродукта проводился с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Mobilab X-50. Исследования по стадийному дроблению на оловянной руде фракции $-5,0+0,0$ мм осуществлялись с использованием конусной дробилки КИД-100 и дисковой мельницы Fritsch Pulverisette 13.

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663 [11].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе минералогического анализа было установлено, что средний размер частиц касситерита в оловянной руде Солнечного ГОКа составляет 0,1 – 0,3 мм, а сульфидов (пирита и халькопирита) – около 1,5 мм. В связи с этим для гравитационного обогащения были выбраны классы: -1,5+0,5, -0,5+0,2, -0,2+0,071 и -0,071+0,0 мм.

По результатам гравитационного обогащения, представленным в табл. 1, выявлено, что лучшим по выходу олова и меди в концентрат является класс -0,2+0,071 мм. Таким образом, можно сделать вывод, что гравитационные процессы необходимо проводить на фракции -0,2+0,0 мм.

Таблица 1

Результаты гравитационного обогащения оловянной руды разных классов крупности

Класс, мм	Элемент	Концентрат			Пром. продукт			Хвосты		
		Выход продукта по массе, %	Содержание в продукте, %	Извлечение, %	Выход продукта по массе, %	Содержание в продукте, %	Извлечение, %	Выход продукта по массе, %	Содержание в продукте, %	Извлечение, %
-1,5+0,5	Sn	2,78	5,49	11,31	77,57	1,40	80,63	19,65	0,55	8,06
	Cu		3,21	8,86		1,06	81,96		0,47	9,18
	W		0,28	11,29		0,07	77,71		0,04	11,00
	As		0,51	15,09		0,10	78,37		0,03	6,53
	Au		0,03	100,00		0,00	0,00		0,00	0,00
	Fe		24,29	6,18		11,35	80,63		7,33	13,19
-0,5+0,2	Sn	27,87	3,15	68,62	72,13	0,56	31,38	0,00		
	Cu		2,88	74,50		0,38	25,50			
	W		0,15	65,92		0,03	34,08			
	As		0,34	79,89		0,03	20,11			
	Au		0,01	100,00		0,00	0,00			
	Fe		19,09	50,57		7,21	49,43			
-0,2+0,071	Sn	31,34	3,80	86,06	67,38	0,28	13,76	1,28	0,20	0,18
	Cu		5,68	91,82		0,21	7,19		1,51	1,00
	W		0,20	84,10		0,02	15,58		0,02	0,32
	As		0,46	94,30		0,01	5,56		0,02	0,14
	Au		0,02	100,00		0,00	0,00		0,00	0,00
	Fe		23,43	64,93		5,78	34,46		5,36	0,61
-0,071+0,0	Sn	3,24	23,45	46,52	36,21	1,14	25,19	60,55	0,76	28,28
	Cu		13,93	23,73		1,92	36,65		1,24	39,62
	W		1,44	44,02		0,06	21,85		0,06	34,13
	As		3,48	65,20		0,08	16,41		0,05	18,39
	Au		0,11	61,21		0,00	0,00		0,004	38,79
	Fe		16,06	4,17		14,93	43,29		10,83	52,54

Для сравнительного анализа стадийного и одноэтапного дробления в ходе первого этапа было проведено измельчение двух проб по одноэтапной схеме до класса $-0,2+0,0$ мм на конусной дробилке КИД-100 и дисковой мельнице Fritsch Pulverisette 13 на классах крупности $-5,0+2,0$, $-2,0+1,0$, $-1,0+0,5$ и $-0,5+0,2$ мм. По результатам одноэтапного дробления, представленным в табл. 2 и 3, установлено, что выход в тонкий класс $-0,071+0,0$ мм достигает 79,3 – 83,2 %.

Таблица 2

Результаты одноэтапного измельчения руды на конусной дробилке КИД-100

Класс	Зазор, мм	Выход, %					
		$-5,0+2,0$	$-2,0+1,0$	$-1,0+0,5$	$-0,5+0,2$	$-0,2+0,071$	$-0,071+0,0$
$-5,0+0,0$		55,4	19,5	8,7	6,2	4,3	5,9
$-5,0+2,0$	0,2					26,8	73,2
$-2,0+1,0$	0,2					26,5	73,5
$-1,0+0,5$	0,2					33,7	66,3
$-0,5+0,2$	0,2					30,7	69,3
Итого						26,2	73,8
Мокрый рассев						20,7	79,3

Таблица 3

Результаты одноэтапного измельчения руды на дисковой мельнице Fritsch Pulverisette 13

Класс	Зазор, мм	Выход, %					
		$-5,0+2,0$	$-2,0+1,0$	$-1,0+0,5$	$-0,5+0,2$	$-0,2+0,071$	$-0,071+0,0$
$-5,0+0,0$		56,2	20,0	8,3	5,8	4,0	5,8
$-5,0+2,0$	0,2					18,0	82,0
$-2,0+1,0$	0,2					2,2	97,8
$-1,0+0,5$	0,2					25,3	74,7
$-0,5+0,2$	0,2					30,4	69,6
Итого						18,7	81,3
Мокрый рассев						16,8	83,2

Вторым этапом исследований являлось изучение дробимости руды и переизмельчения ее в тонкий класс $-0,071+0,0$ мм в зависимости от величины зазора конусной дробилки и дисковой мельницы, а также поиск наилучшего результата для построения схемы стадийного дробления. Навески руды классов $-5,0+2,0$, $-2,0+1,0$, $-1,0+0,5$ и $-0,5+0,2$ мм были продроблены на конусной дробилке и дисковой мельнице в один цикл и расситованы на классы $-5,0+2,0$, $-2,0+1,0$, $-1,0+0,5$, $-0,5+0,2$, $-0,2+0,071$ и $-0,071+0,0$ мм. Результаты дробления были представлены на рис. 2 – 5 в виде графиков с таблицами выхода каждого класса при разных зазорах.

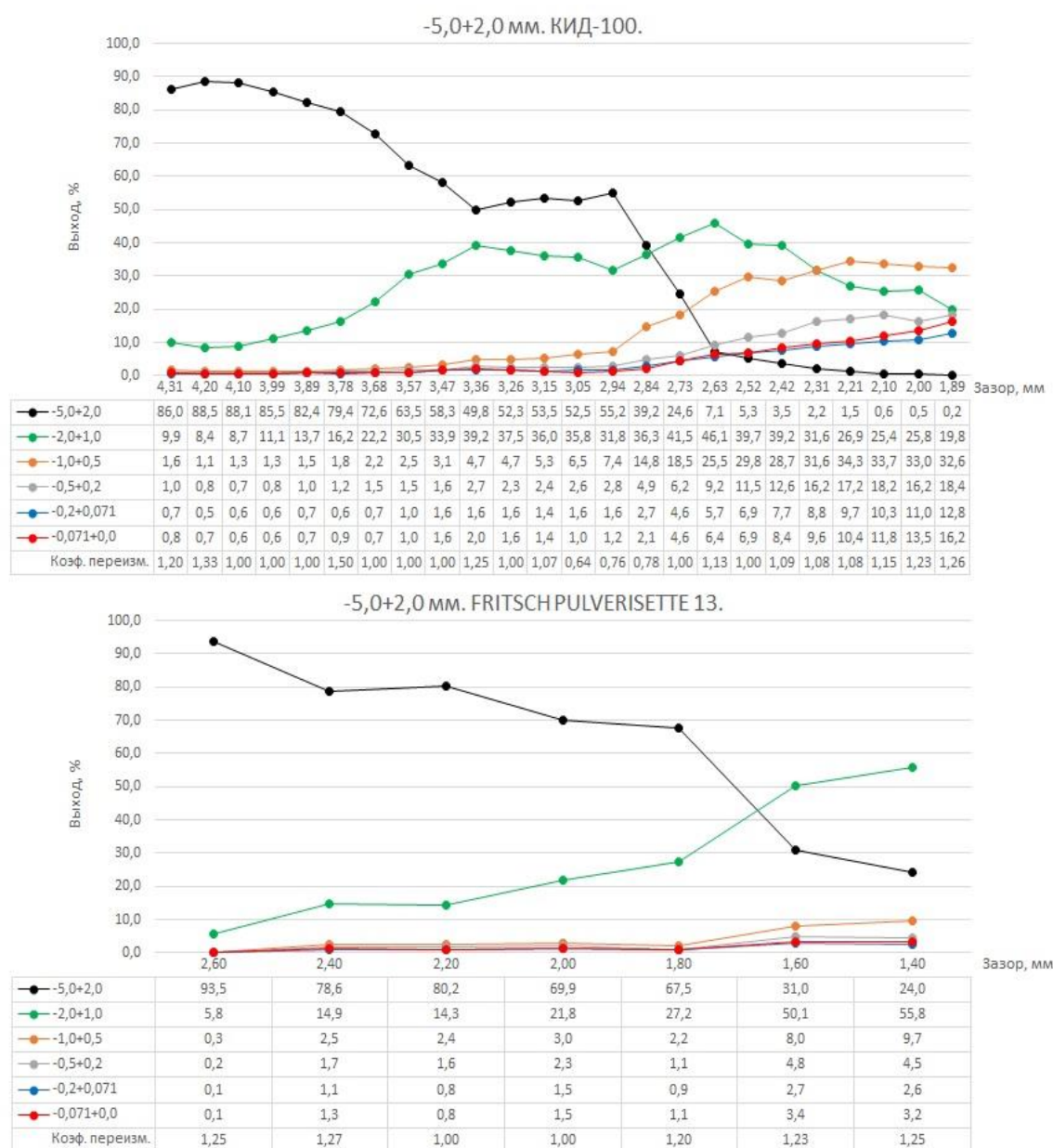


Рис. 2. Анализ дробимости класса $-5,0+2,0$ на разных зазорах

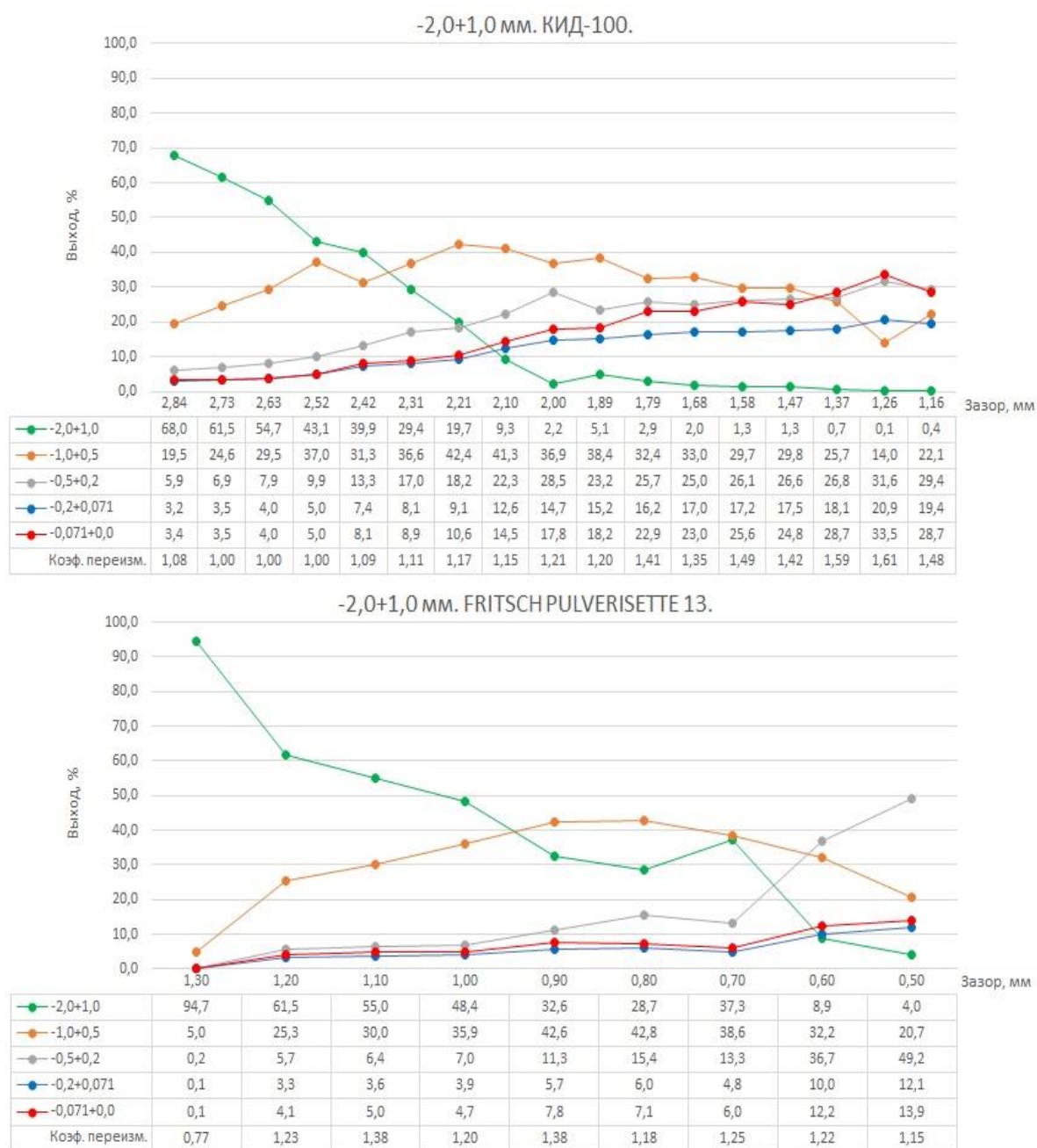


Рис. 3. Анализ дробимости класса -2,0+1,0 на разных зазорах

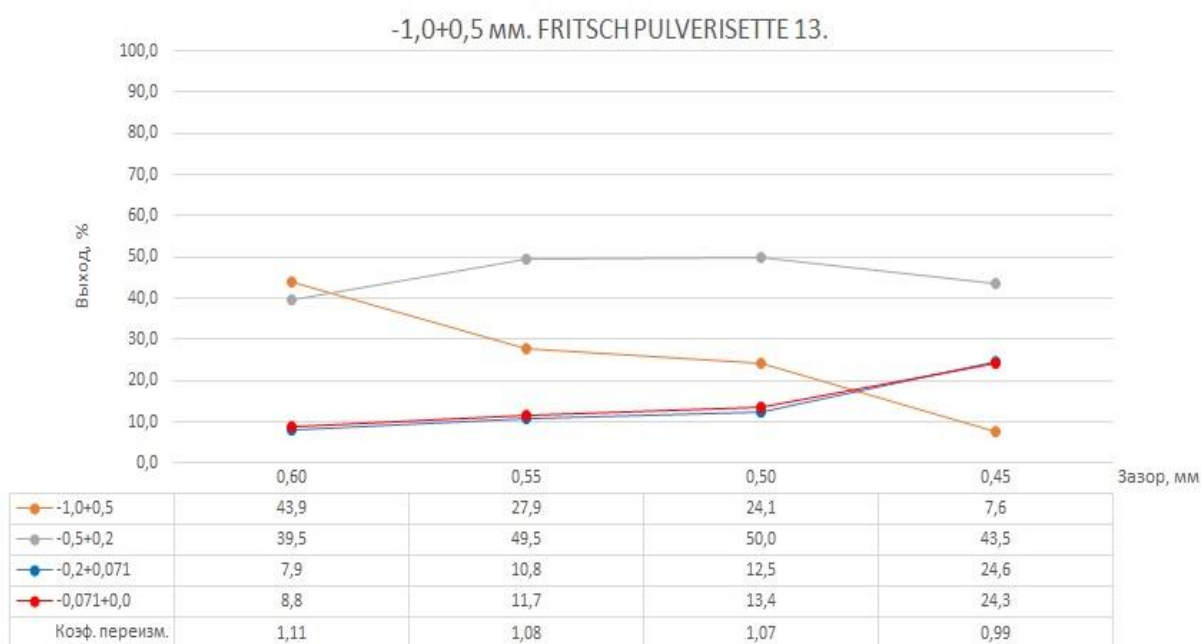
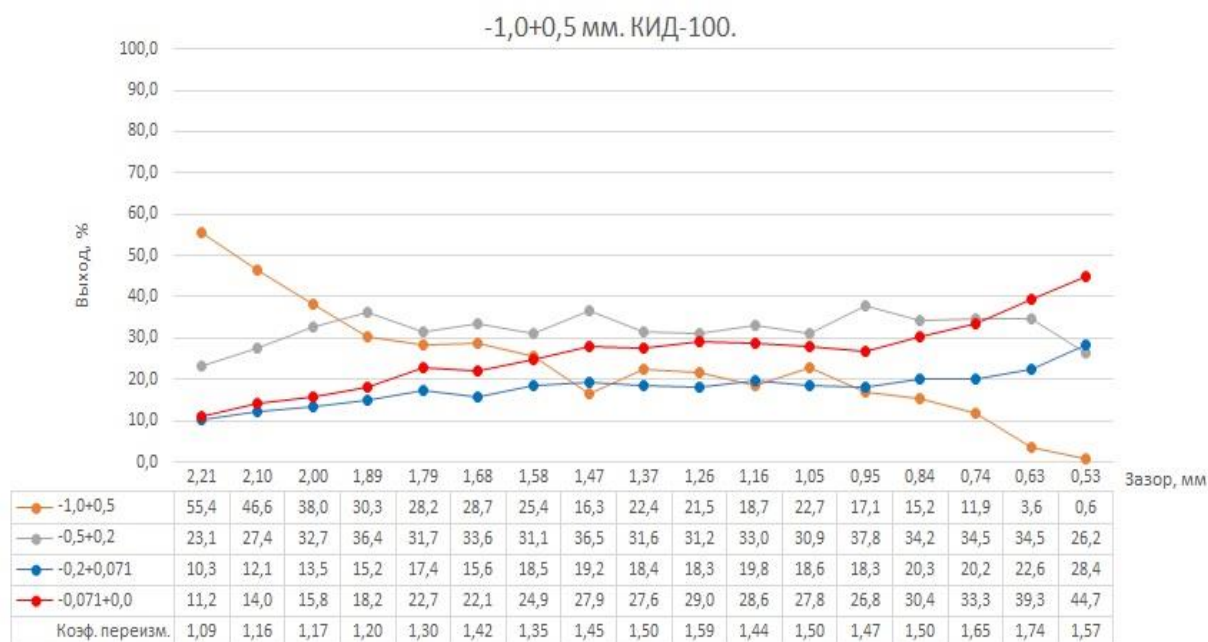


Рис. 4. Анализ дробимости класса -1,0+0,5 на разных зазорах

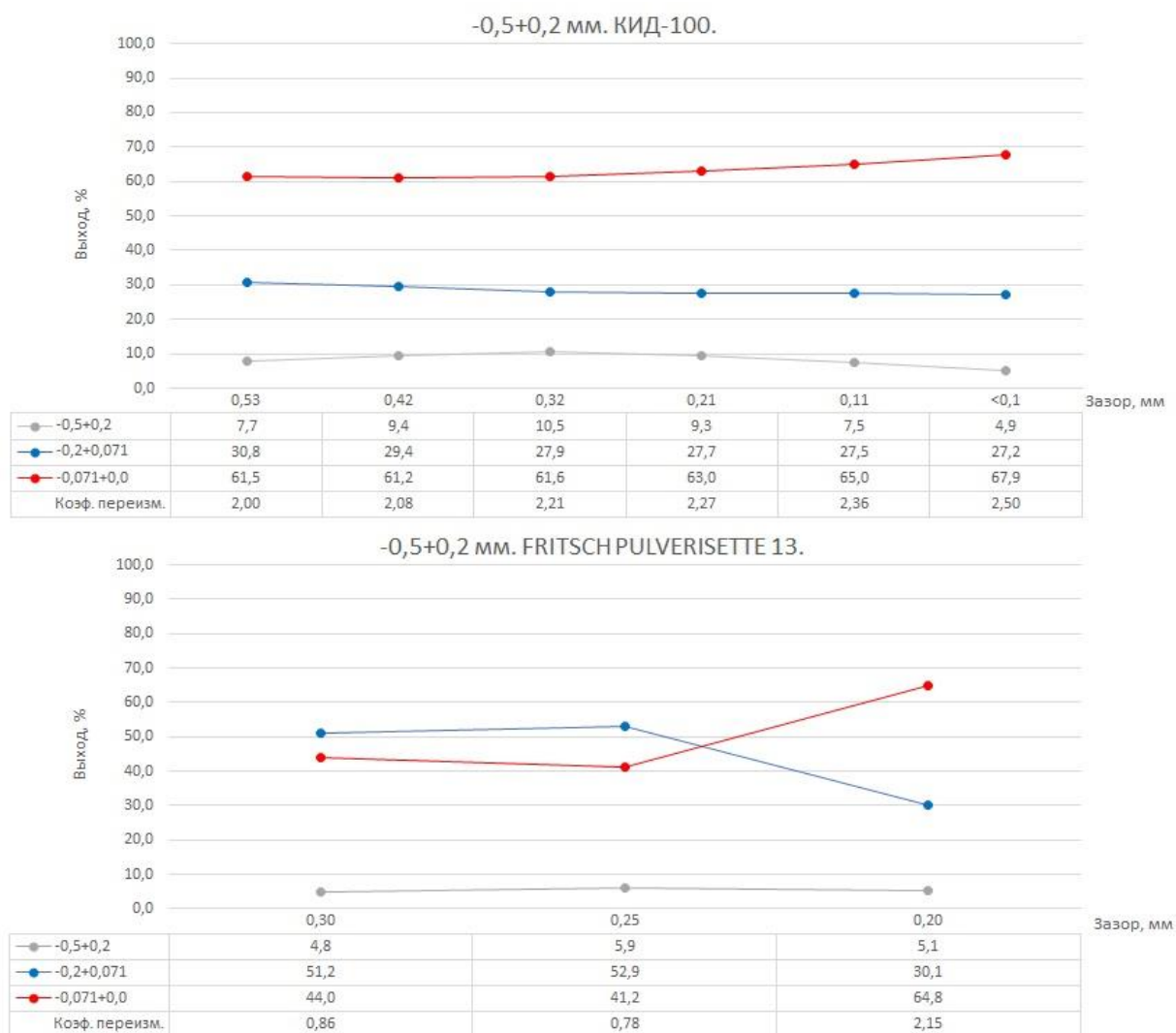


Рис. 5. Анализ дробимости класса -0,5+0,2 на разных зазорах

На последнем этапе исследований, исходя из полученных данных по результатам измельчения оловянной руды, были выбраны режимы дробления для каждого класса отдельно, исходя из таких показателей, как наименьший коэффициент переизмельчения ($k_{\text{пер}}$) и наименьший выход дробленого материала в тонкий класс (-0,071+0,0 мм).

Коэффициент переизмельчения был представлен на рис. 2 – 5 и определялся по формуле

$$k_{\text{пер}} = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{н}}$ – выход необходимого для обогащения класса после дробления (в данном случае -0,2+0,071); $m_{\text{п}}$ – выход более тонкого класса по отношению к необходимому к обогащению после дробления (в данном случае -0,071+0,0).

Затем на выбранных режимах дробления на руде класса -5,0+0,0 проводились эксперименты по стадийному дроблению на конусной дробилке КИД-100 и дисковой мельнице Pulverisette 13 по схеме, представленной на рис. 6.

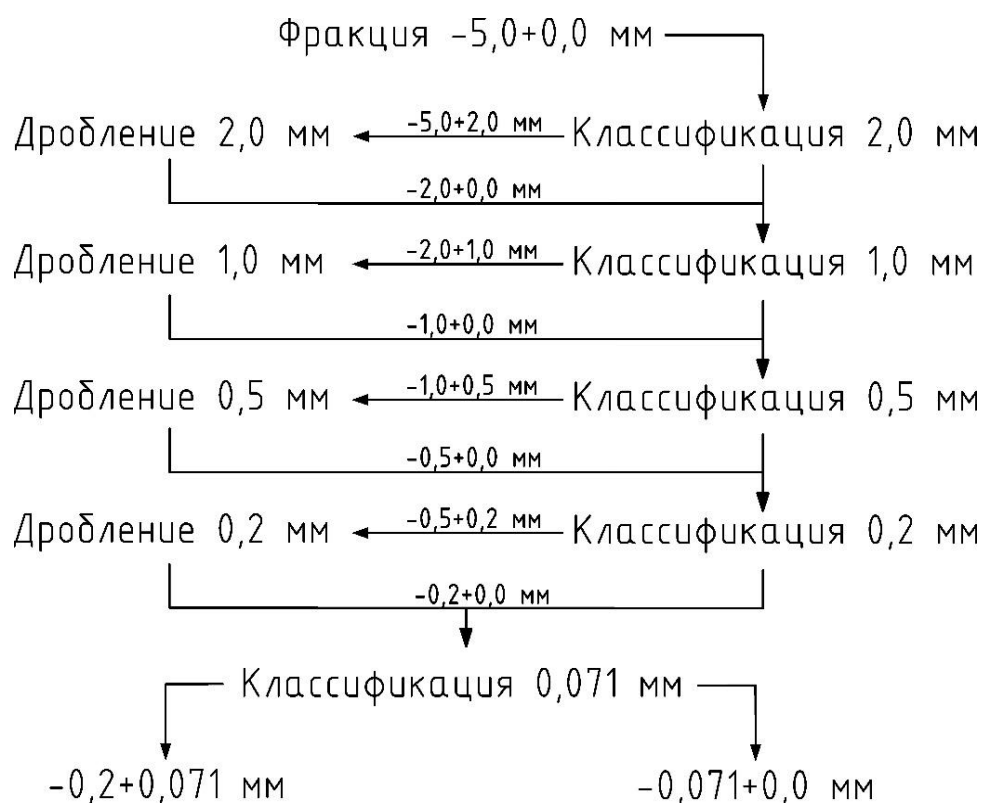


Рис. 6. Схема стадийного дробления оловянной руды класса -5,0+0,0

Результаты стадийного дробления руды на конусной дробилке КИД-100 и Pulverisette 13 представлены в табл. 4 и 5, соответственно.

Таблица 4
Результаты стадийного дробления руды на конусной дробилке КИД-100

Класс	Зазор, мм	Выход, %					
		-5,0+2,0	-2,0+1,0	-1,0+0,5	-0,5+0,2	-0,2+0,071	-0,071+0,0
-5,0+0,0		56,0	19,5	8,3	6,0	4,2	6,0
-5,0+2,0	3,05		72,2	13,3	6,2	3,7	4,6
-2,0+1,0	2,52			64,1	18,3	8,5	9,1
-1,0+0,5	2,21				60,2	19,2	20,6
-0,5+0,2	0,32					29,2	70,8
Итого						37,3	62,7
Мокрый рассев						33,3	66,7

Таблица 5

Результаты стадийного дробления руды на дисковой мельнице Fritsch Pulverisette 13

Класс	Зазор, мм	Выход, %					
		-5,0+2,0	-2,0+1,0	-1,0+0,5	-0,5+0,2	-0,2+0,071	-0,071+0,0
-5,0+0,0		54,9	19,6	8,8	6,3	4,4	6,0
-5,0+2,0	1,80		76,0	10,0	5,6	3,6	4,8
-2,0+1,0	1,00			66,4	15,1	7,8	10,7
-1,0+0,5	0,55				65,3	16,0	18,7
-0,5+0,2	0,25					42,5	57,5
Итого						43,2	56,8
Мокрый рассев						41,7	58,3

В результате проведенной исследовательской работы была доказана эффективность стадийного дробления руды по сравнению с одноэтапным дроблением. Выход дробленой руды в тонкий класс $-0,071+0,0$ мм уменьшился с 79,3 до 58,3 %. Также была установлена разница при измельчении руды дробилками конусного типа и дисковыми мельницами. При измельчении оловянной руды фракции $-0,5+0,2$ мм с использованием дисковой мельницы по сравнению с конусной дробилкой уменьшился выход дробленой руды в тонкий класс $-0,071+0,0$ мм с 70,8 до 57,5 %. Такой эффект, вероятно, связан с особенностью принципиальной работы дробилок, при которой на конусной дробилке зазор в зоне низких значений давал существенный разброс, в то время как зазор на дисковой мельнице оставался статичен.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о целесообразности использования стадийного дробления при пробоподготовке оловянной руды для дальнейшего гравитационного обогащения. При этом дробление необходимо осуществлять преимущественно с использованием измельчителей, принцип работы которых включает максимально статичную регулировку зазора между футеровками в зоне низких значений (до 0,5 мм).

Весь этап пробоподготовки (дробление) оловянной руды Солнечного ГОКа можно представить в виде схемы стадийного дробления, показанной на рис. 7.

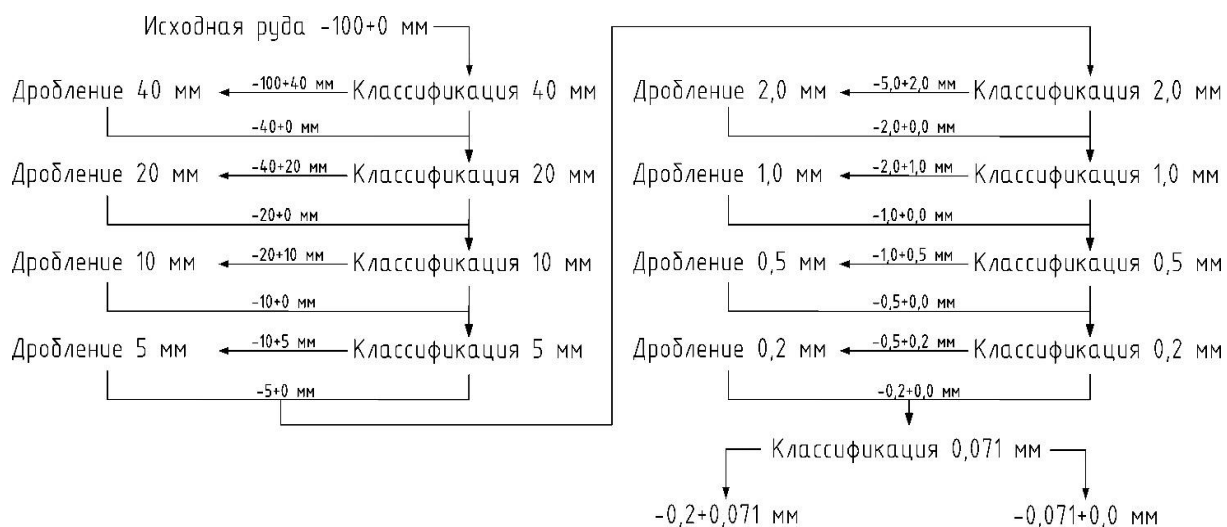


Рис. 7. Общая схема пробоподготовки (стадийное дробление) оловянной руды Солнечного ГОКа

Заключение

В процессе минералогического анализа оловянной руды Солнечного ГОКа было установлено, что средний размер частиц касситерита в пробе равен 0,1 – 0,3 мм, а сульфидов (пирита и халькопирита) – около 1,5 мм, при этом наиболее эффективный класс для гравитационного обогащения как олова, так и меди – фракция -0,2+0,071 мм.

Из-за природной хрупкости касситерита (основного минерала при добыче олова) при дроблении руды до гравитационно обогатимого класса -0,2+0,071 мм существует проблема переизмельчения минерала в тонкий класс -0,071 мм, который в свою очередь плохо поддается гравитационному и флотационному обогащению.

В ходе проведенных экспериментальных работ с целью уменьшения переизмельчения руды в процессе пробоподготовки была установлена эффективность использования стадийного дробления по сравнению с одноэтапным дроблением. При стадийном дроблении выход дробленной пробы в тонкий класс -0,071+0,0 мм уменьшился на 21 % по сравнению с одноэтапным дроблением.

Также в ходе экспериментальных работ было установлено, что при дроблении руды класса -0,5+0,2 мм с использованием дисковой мельницы переизмельчение руды в тонкий класс -0,071+0,0 мм было меньше на 13,3 % по сравнению с использованием конусной дробилки.

Список литературы

1. Матвеева Т.Н., Гетман В.В., Рязанцева М.В., Каркешкина А.Ю., Ланцова Л.Б., 2019. Обогащение упорных оловянных руд с применением новых реагентов для извлечения цветных и благородных металлов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 150-157.
2. Егорова И.В., Лаптева А.М., 2019. Прогноз добычи минерального сырья и обеспеченность мировой экономики его ресурсами. *Руды и металлы*, № 3, С. 4-11.
3. Falcon L. M., 1982. The gravity recovery of cassiterite. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 82, No 4, P. 112-117.
4. Матвеев А.И., Еремеева Н.Г., 2011. *Технологическая оценка месторождений олова Якутии*. Отв. ред. С.М. Ткач; Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского. Новосибирск: Академическое издательство "Гео", 119 с.
5. Rodliyah I. et al., 2021. Beneficiation of cassiterite from primary tin ores using gravity and magnetic separation. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, No. 882, 012008 p.
6. Ibrahim S.S. et al., 2022. Recovery of Cassiterite and Topaz Minerals from an Old Metallurgical Dump, Eastern Desert of Egypt. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, No 10, P. 57-80.
7. Oladunni O.A. et al., 2024. Investigating the Gravity Beneficiation Consequence on Farin-Lamba (Plateau State) Cassiterite towards Tin Oxide Production. *Saudi J Eng Technol*, No 9(2), P. 121-127.
8. Simonsen H. et al., 2024. Can preconcentration of cassiterite from its pegmatite ore reduce processing costs and improve operational sustainability? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 124, No. 4, P. 201-208.
9. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*: в 2 кн. Под ред. А. И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1., 572 с.
10. Иванков С.И., Троицкий А.В., Петкевич-Сочнов Д.Г., Иванков З.С., 2016. Пути решения экологических проблем инновационных технологий обогащения различных видов минерального сырья. *Научные и технические аспекты охраны окружающей среды*, № 6, С. 2-106.
11. Прохоров К.В., Гладырь А.В., Рассказов М.И., 2020. Центр коллективного пользования "Центр исследования минерального сырья". *Горная промышленность*, № 4, С. 120-124.

References

1. Matveeva T.N., Getman V.V., Ryazantseva M.V., Karkeshkina A.Yu., Lantsova L.B., 2019. Obogashchenie upornyykh olovyannykh rud s primeneniem novykh reagentov dlya izvlecheniya tsvetnykh i blagorodnykh metallov [Enrichment of refractory tin ores using new reagents for the extraction of non-ferrous and precious metals]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, P. 150-157.
2. Egorova I.V., Lapteva A.M., 2019. Prognoz dobychi mineral'nogo syr'ya i obespechennost' mirovoi ekonomiki ego resursami [Forecast of mineral production and the provision of the world economy with its resources]. *Rudy i metally*, № 3, P. 4-11.
3. Falcon L.M., 1982. The gravity recovery of cassiterite. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 82, No 4, P. 112-117.
4. Matveev A.I., Ereemeva N.G., 2011. Tekhnologicheskaya otsenka mestorozhdenii olova Yakutii [Technological assessment of tin deposits in Yakutya]. *Otv. red. S.M. Tkach; Ros. akad. nauk, Sibirskoe otdelenie, Institut gornogo dela Severa im. N.V. Cherskogo. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo"*, 119 p.
5. Rodliyah I. et al., 2021. Beneficiation of cassiterite from primary tin ores using gravity and magnetic separation. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, No. 882, 012008 p.
6. Ibrahim S.S. et al., 2022. Recovery of Cassiterite and Topaz Minerals from an Old Metallurgical Dump, Eastern Desert of Egypt. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, No 10, P. 57-80.
7. Oladunni O.A. et al., 2024. Investigating the Gravity Beneficiation Consequence on Farin-Lamba (Plateau State) Cassiterite towards Tin Oxide Production. *Saudi J Eng Technol*, No 9(2), P. 121-127.
8. Simonsen H. et al., 2024. Can preconcentration of cassiterite from its pegmatite ore reduce processing costs and improve operational sustainability? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 124, No. 4, P. 201-208.
9. 9. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia]: v 2 kn. Pod red. A. I. Khanchuka. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. Kn. 1., 572 p.
10. Ivankov S.I., Troitskii A.V., Petkevich-Sochnov D.G., Ivankov Z.S., 2016. Puti resheniya ekologicheskikh problem innovatsionnykh tekhnologii obogashcheniya razlichnykh vidov mineral'nogo syr'ya [Ways to solve environmental problems of innovative technologies for the enrichment of various types of mineral raw materials]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchei sredy*, № 6, P. 2-106.
11. Prokhorov K.V., Gladyr' A.V., Rasskazov M.I., 2020. Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya "Tsentr issledovaniya mineral'nogo syr'ya" [Centre of collective usage "Mineral Research Center"]. *Gornaya promyshlennost'*, № 4, P. 120-124.

УДК 622.013.364

Рассказова Анна Вадимовна,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: annbot87@mail.ru

Самборская Татьяна Сергеевна,
аспирант,
Хабаровский Федеральный
исследовательский центр ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Дзержинского, 54
e-mail: klochкова.t@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ОТВАЛЬНОЙ ЗАБАЛАНСОВОЙ РУДЫ МАЛМЫЖСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация:

В статье приведены результаты исследования вещественного состава медно-порфировых забалансовых руд Малмыжского месторождения, их химико-минералогический и гранулометрический состав. Показаны содержания меди, а также исследованы формы нахождения меди в пробах окисленной медно-порфировой руды, складированной в отвалах (склад забалансовой руды) зоны окисления Малмыжского месторождения Хабаровского края. Также рассмотрена возможность переработки забалансовых руд методами флотации и кучного выщелачивания.

Ключевые слова: месторождение Малмыжское, медно-порфировые забалансовые руды, медь, халькопирит, фазовый анализ, отвал, минералы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.051

Rasskazova Anna V.
Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Institute of Mining, Far Eastern branch of RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgenyeva Str.
e-mail: annbot87@mail.ru

Samborskaya Tatyana S.
Postgraduate Student,
Khabarovsk Federal Research Center,
Far Eastern branch of RAS,
680000 Khabarovsk, 54 Dzerzhinskiy Str.
e-mail: klochкова.t@bk.ru

STUDY OF THE MATERIAL COMPOSITION OF THE WASTE OFF-BALANCE ORE OF MALMYZH DEPOSIT

Abstract:

This article presents the results of the study of the composition of copper-porphyry off-balance ores of the Malmyzh deposit, their chemical-mineralogical and grain-size composition. The copper content is defined, and the forms of copper in oxidized copper-porphyry ore off-balance stockpile of Malmyzh deposit in Khabarovsk Krai are studied. Also, the possibility of processing off-balance ores by flotation and heap leaching methods is considered.

Key words: Malmyzh deposit, copper-porphyry off-balance ores, copper, chalcopyrite, phase analysis, waste, minerals.

Введение

Истощение запасов сырьевой базы меди ставит предприятия перед необходимостью изыскания дополнительных медьсодержащих ресурсов [1]. Источником минерального сырья, содержащего цветные и другие металлы, могут являться окисленные руды. При переработке таких руд традиционным флотационным методом получают низкосортные концентраты при низком извлечении металлов (35 – 50 %). Считается, что наиболее перспективным направлением переработки подобных руд является кучное выщелачивание (КВ) [2].

Объектами, пригодными для отработки способом КВ, являются руды месторождений различных генетических типов, полезные компоненты которых могут быть переведены в раствор с последующим получением ликвидных товарных продуктов. Благоприятные геотехнологические условия освоения месторождения способом КВ определяются природными факторами, которые существенным образом влияют на возможность его применения, ход и результаты. В настоящее время более трети мировой добычи металлов приходится на технологию кучного выщелачивания. В последние годы эта технология широко развивается и в России. Установки кучного выщелачивания создаются и успешно эксплуатируются в различных регионах страны.

Использование кучного выщелачивания позволяет вовлекать в отработку не только крупные месторождения бедных руд, но также и вскрышные породы, техноген-

ное золотосодержащее сырье (хвосты обогащения руд цветных и драгоценных металлов) и небольшие по запасам месторождения (от нескольких десятков килограммов до 1–2 т), расположенные в малоосвоенных районах.

Опыт ряда зарубежных и отечественных предприятий по переработке бедных и забалансовых руд относительно малозатратным методом КВ при соблюдении ряда условий, основным из которых является достаточная изученность характера минерального сырья, показывает перспективность данной технологии [3].

Для всех промышленных типов медных руд технология переработки включает их обогащение. Окисленные медные руды комплексного состава обогащаются значительно хуже, чем сульфидные, и относятся к категории упорных.

По степени окисления руды медных месторождений подразделяются на первичные (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 эти цифры уточняются в процессе технологических исследований) [4].

Объект и материалы исследования

Золото-медно-порфировое Малмыжское месторождение находится в Нанайском районе Хабаровского края в 270 км от г. Хабаровск и занимает общую площадь 153 кв.км.

Месторождение представлено оруденелыми диорит-порфиритами, локально гранодиорит-порфирами в различной степени метасоматизированными: от незначительно проявленной биотитизации до трансформации в метасоматиты карбонат-эпидот-хлорит-кварцевого, серицит-карбонат-кварцевого, серицит-карбонат-полевошпат-кварцевого парагенезиса. Кроме того, в метасоматизированных диорит-порфиритах, гранодиорит-порфирах и метасоматитах локально проявлены процессы актинолитизации. На первичные сульфидные руды приходится более 90 % оцененных запасов руд и металлов [5 – 6].

Как и для большинства формационных аналогов данного месторождения, для него характерна выраженная зона окисления. Зона окисления на месторождении, по данным В.В. Иванова и Е.К. Игнатьева [5], развита практически повсеместно, захватывает четвертичные рыхлые отложения (мощностью до 25 м) и подстилающие их терригенные и интрузивные породы. Глубина ее колеблется от 10 до 15 м, местами до 40 – 50 м и редко до 70 м.

В преобладающих, неравномерно окисленных и выщелоченных сульфидных рудах остаточные содержания меди обычно не превышают 0,1 %. Остаточные содержания золота в них составляют 0,1–0,6 г/т, иногда достигая 1,0 – 1,5 г/т, редко до 4 г/т (участок Свобода). Промышленно значимые (0,2 – 0,3 % Cu) руды в зоне окисления сохранились на месторождении лишь местами [7].

Учитывая в целом значительный ресурсный потенциал этого месторождения (по меди 1,2 млн т, 290 т по золоту) и относительно низкие содержания ценных металлов, очевидна актуальность глубокого изучения минералого-геохимических характеристик его первичных и окисленных руд с позиций обоснования эффективных технологий их переработки. В среднем содержание меди в первичных рудах 0,3 – 0,6 %, золота – 0,1 – 0,5 г/т, но при этом возможно выделение для селективной выемки обогащенных зон с содержанием меди в первичных рудах до 1,5 %, золота – до 3 г/т [8 – 10].

Соответственно, при освоении Малмыжского месторождения возникает необходимость использования двух технологических схем переработки руд: с флотационным обогащением первичных руд и кучным выщелачиванием окисленных руд. Граничные значения вещественно-концентрационных параметров рудной массы для применимости технологии должны определяться по результатам геолого-технологических исследований и экономических расчетов [10 – 11].

Методы исследования

Для проведения на данном этапе предварительных лабораторных аналитических и тестовых геотехнологических исследований медно-порфировых забалансовых окисленных руд Малмыжского месторождения были отобраны пробы с отвалов рудных участков «Долина-1», «Долина-2» и «Центральный». Пробы содержали как сильно раздробленный скальный грунт, так и крупные куски, представляющие собой смесь скальных пород и глины. Пробы были отобраны бороздовым способом, представительность обеспечена. Отбор проб осуществлялся из пяти точек каждого отвала («Долина-1», «Долина-2», и «Центральный»); было составлено три технологические пробы массой по 100 кг. Аналитические пробы выделены методом квартования для проведения химического фазового анализа. Отобранные с отвалов пробы окисленных медно-порфировых забалансовых руд были додроблены до класса -5 мм и расситованы по классам крупности.

Определение минеральных форм меди проводилось методом химического фазового анализа в соответствии с ГОСТ 33207- 2014 «Руды медесодержащие и полиметаллические и продукты их переработки. Методы измерений массовой доли меди в минеральных формах» [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание сопутствующих ценных компонентов в каждом классе крупности определено методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты анализа элементного состава проб окисленной руды
Малмыжского месторождения методом РФА**

Класс крупности, мм	K, ppm	Ca, ppm	Ti, ppm	Mn, ppm	Fe, ppm	Sr, ppm	Zr, ppm	Ba, ppm
Долина 1								
+3	17943,0	4026,7	3183,0	522,0	23829,0	286,3	199,7	774,3
-3+1	16893,0	4796,3	3584,3	633,0	28953,0	244,3	201,3	697,7
-1+0,5	11735,7	3259,0	3638,7	642,3	29463,0	274,3	370,7	596,7
-0,5+0,2	11161,0	2939,3	3673,3	659,3	29836,0	176,0	251,0	563,7
-0,2+0	15393,7	4212,3	4528,7	777,3	34888,0	221,7	334,3	627,0
Долина 2								
+3	17620,3	14587,7	2911,0	1705,3	28736,0	181,7	192,7	483,0
-3+1	19255,0	5832,3	2654,7	1255,3	26082,0	99,7	180,3	660,3
-1+0,5	12770,3	2059,0	3574,7	1280,0	43011,0	82,0	142,7	464,3
-0,5+0,2	12479,3	1494,7	3373,0	1063,7	42237,7	70,0	143,3	444,7
-0,2+0	13076,0	1976,7	3851,0	950,3	42854,0	84,3	192,7	433,7
Центральный								
+3	16636,0	3785,0	3123,3	191,3	19618,0	251,3	177,7	697,7
-3+1	19158,3	3990,7	3708,7	311,0	29205,7	249,3	229,0	755,3
-1+0,5	15955,0	1970,0	3842,3	423,3	34580,7	174,0	474,3	693,3
-0,5+0,2	15475,3	1735,0	3918,0	368,3	35242,3	115,7	297,0	605,3
-0,2+0	18611,0	2253,7	4517,3	435,3	38938,3	119,3	364,3	639,7

Содержание сопутствующих рудных элементов, за исключением марганца, циркония, стронция, бария и титана, практически находится на уровне геохимического фона. Максимальным содержанием марганца отличаются отвалы участка Долина 2. Содержание сопутствующих компонентов в различных классах крупности равномерное по пробе.

Определение содержания меди и железа выполнено методом атомно-адсорбционного анализа (ААС) НСАМ-155-ХС-1 Методика КХА. Определение меди, цинка, кадмия, висмута, сурьмы, свинца, кобальта, никеля, железа и марганца – атомно-абсорбционным методом в твердых сыпучих материалах [13]. Также выполнен расчет распределения ценных компонентов в пробах по классам крупности (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение меди и железа по гранулометрическим фракциям
забалансовой руды**

Класс крупности, мм	Выход %	Массовая доля		Распределение	
		Cu, ppm	Fe, ppm	Cu, %	Fe, %
Долина 1					
+3	22,3	37,6	20000	17,3	20,5
-3+1	63,5	55	21000	72,1	61
-1+0,5	1,2	48,4	31000	1,2	1,7
-0,5+0,2	2,8	37,5	29000	2,2	3,6
-0,2+0	10,1	34,7	29000	7,2	13,2
Итого	100	48,5	22000	100	100
Долина 2					
+3	30,9	30,9	801000	21,8	25
-3+1	58,2	58,2	1179000	77	69,3
-1+0,5	1,5	1,5	621000	0,1	0,9
-0,5+0,2	2,7	2,7	411000	0,2	1,1
-0,2+0	6,7	6,7	532000	1	3,6
Итого	100	44,0	990000	100	100
Центральный					
+3	22,7	22,7	400000	13,7	16,1
-3+1	55,2	55,2	553000	81,2	54,2
-1+0,5	3,1	3,1	896000	0,3	5
-0,5+0,2	9,3	9,3	811000	2,3	13,4
-0,2+0	9,7	9,7	659000	2,5	11,3
Итого	100	37,5	563000	100	100

По пробе Долина 1 наблюдается равномерное содержание меди по классам -35-55 ppm. По пробам Долина 2 и Центральный максимальным содержанием меди характеризуются классы +1 мм – 58-31 ppm и 23-55 ppm, соответственно. Нижние классы (-1+0 мм) содержат 1,5-6 ppm и 3-10 ppm, соответственно, для Долина 2 и Центральный. Распределение меди таково, что в верхних классах крупности +3, -3+1 мм содержится 89 – 99 % всей меди. Такое распределение, в частности, объясняется высоким выходом данных классов.

В табл. 3 представлены данные фазового анализа меди и минеральные формы ее нахождения.

Таблица 3

Химический фазовый анализ минеральных форм меди

Класс крупности, мм	Массовая доля меди в первичных сульфидах, %	Массовая доля меди во вторичных сульфидах, %	Массовая доля меди в «свободных» окисленных минералах, %	Массовая доля меди в «связанных» (вторичных) окисленных минералах меди, %
	Долина 1			
+3	50,17	24,95	9,32	15,56
-3+1	50,19	24,99	8,80	16,03
-1+ 0,5	60,02	8,63	15,94	15,41
-0,5+0,2	63,02	5,52	16,53	14,93
-0,2+0	59,19	2,65	23,47	14,69
	Долина 2			
+3	61,83	27,02	8,42	2,73
-3+1	63,24	26,36	7,52	2,88
-1+ 0,5	41,27	9,83	29,43	19,47
-0,5+0,2	39,61	5,77	33,61	21,01
-0,2+0	38,93	10,48	28,41	22,18
	Центральный			
+3	82,61	6,12	5,90	5,37
-3+1	75,55	6,95	7,90	9,59
-1+ 0,5	56,63	6,16	22,74	14,46
-0,5+0,2	52,30	4,02	19,63	24,05
-0,2+0	54,89	5,83	18,87	20,42

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что в исследуемых окисленных забалансовых рудах 40 – 80 % меди находится в первичных сульфидах (в частности, в халькопирите).

Вторичные сульфиды (халькозин, борнит, ковеллин) в пробах Долина 1 и Долина 2 составляют 25 – 27 % в классах + 1 мм; в нижних классах (-1 мм) доля вторичных сульфидов – 2 – 10 %. В отвале Центральный 4 – 7 % вторичных сульфидов (в частности, халькозина).

Свободные окисленные минералы меди (сульфаты, гидроксилхлориды, карбонаты, оксиды меди), обладающие большей хрупкостью при дроблении, переходят преимущественно в тонкие классы (-1 мм).

В отвалах окисленных руд Долина 2 и Центральный массовая доля меди в «связанных» (вторичных) окисленных минералах меди (силикатные формы окисленных минералов меди) колеблется от 14 до 24 % в тонких классах (-1 мм), что отражает большую хрупкость окисленных минералов меди. В отвале Долина 1 наблюдается более равномерное содержание данной формы меди.

Заключение

В результате исследования форм нахождения меди в отвалах забалансовой окисленной руды было установлено, что процессы гипергенеза полностью не завершены, поэтому в данных рудах в относительно значительных количествах (40 – 80 %) присутствует медь в форме сульфидов, в основном в виде халькопирита.

Окисленные формы меди склонны к переизмельчению и переходят в нижние классы (-1 мм), составляют 30 – 50 % в зависимости от пробы.

Возможно додрабливание и разделение по классу +1 мм. Надрешетный продукт, преимущественно содержащий медь в сульфидной форме, может использоваться для подшихтовки в процессах флотационного обогащения. Подрешетный продукт, содержащий медь в окисленной форме (на 30 – 50 %), после окомкования может подвергаться кучному выщелачиванию, так как окисленные формы меди легко выщелачиваются с высокими показателями извлечения.

Список литературы

1. Александрова Т.Н., 2022. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы. *Записки Горного института*, Т. 256, С. 503-504.
2. Оценка возможности переработки бедных окисленных комплексных медных руд способом кучного выщелачивания. Научный совет по методам технологических исследований. Методические рекомендации № 136. Москва, 2019. URL: https://vims-geo.ru/media/documents/metodicheskiye_rekomendatsii_136.pdf (дата обращения 19.06.2025)
3. Секисов А.Г., Рассказова А.В., Конарева Т.Г., 2023. Комбинированные геотехнологические схемы освоения золотосодержащих техногенных минеральных образований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-2, С. 116-128.
4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р. URL: <https://amurinform.ru/wp-content/uploads/2015/10/met.rek.-mednye-rudy.pdf> (дата обращения 19.06.2025)
5. Иванов В.В., Кононов В.В., Игнатьев Е.К., 2013. Минералого-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золотомедного рудного поля Малмыж (нижнее Приамурье). *Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции, 17-20 сентября 2013, г. Хабаровск*. Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилов. Владивосток: Дальнаука, С. 258-261.
6. Секисов А.Г. и др., 2019. Разработка научных основ и инновационных технологий комплексной переработки минерального сырья Дальневосточного региона. Отчет о НИР от 12.01.2019.
7. Секисов А.Г., Иванов В.В., Рассказова А.В., Игнатьев Е.К., 2018. Геохимические особенности руд зоны окисления медно-золоторудного месторождения Малмыж и результаты их геотехнологического тестирования. *Горный журнал*, № 10, С. 30-35.
8. Рассказова А.В., 2019. Методы обогащения бедных золотомедных руд. *Проблемы недропользования*, № 2 (21), С. 122-129.
9. Gurman M.A., Shcherbak L.I., 2023. Process Mineralogy of the Malmyzh Deposit. *Journal of Mining Science*, vol. 59(1), pp. 148–156. DOI: 10.1134/S1062739123010167.
10. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинова Н.М., Конарева Т.Г., Андриященко А.С., 2023. Совершенствование схем добычи и переработки руд при освоении сложно-структурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 57-67.
11. Rasskazov I.Yu., Gurman M.A., Shcherbak L.I., 2023. The Genetic Features and Flotation Properties of Porphyry–Copper–Gold Ore (Malmyzh Deposit, Khabarovsk Krai, Russia). *Doklady Earth Sciences*. DOI: 10.1134/S1028334X23601748.
12. ГОСТ 33207- 2014 Руды медесодержащие и полиметаллические и продукты их переработки. Методы измерений массовой доли меди в минеральных формах. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763516.pdf> (дата обращения 10.06.2025)

13. НСАМ-155-ХС-1 *Методика КХА. Определение меди, цинка, кадмия, висмута, сурьмы, свинца, кобальта, никеля, железа и марганца атомно-абсорбционным методом в твердых сыпучих материалах.* URL: <https://lepton.ru/GOST/Index2/1/4293753/4293753572.htm> (дата обращения 10.06.2025)

References

1. Aleksandrova T.N., 2022. Kompleksnaya i glubokaya pererabotka mineral'nogo syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya: sostoyanie i perspektivy [Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin: state and prospects]. Zapiski Gornogo instituta, Vol. 256, P. 503-504.
2. Otsenka vozmozhnosti pererabotki bednykh okislennykh kompleksnykh mednykh rud sposobom kuchnogo vyshchelachivaniya [Assessment of the possibility of processing poor oxidized complex copper ores by heap leaching]. Nauchnyi sovet po metodam tekhnologicheskikh is-sledovaniy. Metodicheskie rekomendatsii № 136. Moscow, 2019. URL: https://vims-geo.ru/media/documents/metodicheskiye_rekomendatsii_136.pdf (data obrashcheniya 19.06.2025)
3. Sekisov A.G., Rasskazova A.V., Konareva T.G., 2023. Kombinirovannye geotekhnologicheskie skhemy osvoeniya zolotosoderzhashchikh tekhnogennykh mineral'nykh obrazovaniy [Combined geotechnological schemes for the development of gold-bearing technogenic mineral formations]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 12-2, P. 116-128.
4. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznnykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh [Methodological recommendations for the application of Classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals]. Mednye rudy. Utverzhdeny rasporyazheniem MPR Rossii ot 05.06.2007 g. № 37-r. URL: <https://amurinform.ru/wp-content/uploads/2015/10/met.rek.-mednye-rudy.pdf> (data obrashcheniya 19.06.2025)
5. Ivanov V.V., Kononov V.V., Ignat'ev E.K., 2013. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rudnoi mineralizatsii v metasomatitakh zolotomednogo rudnogo polya Malmyzh (nizhnee Priamur'e) [Mineralogical and geochemical features of ore mineralization in metasomatites of the Malmyzh gold and copper ore field (Lower Amur region)]. Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii: VIII Kosygin'skie chteniya: materialy Vserossiiskoi konferentsii, 17-20 sentyabrya 2013, g. Khabarovsk. Otv. red. A.N. Didenko, Yu.F. Manilov. Vladivostok: Dal'-nauka, P. 258-261.
6. Sekisov A.G. i dr., 2019. Razrabotka nauchnykh osnov i innovatsionnykh tekhnologii kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya Dal'nevostochnogo regiona [Development of scientific foundations and innovative technologies for complex processing of mineral raw materials in the Far Eastern region of Russia]. Otchet o NIR ot 12.01.2019.
7. Sekisov A.G., Ivanov V.V., Rasskazova A.V., Ignat'ev E.K., 2018. Geokhimicheskie osobennosti rud zony okisleniya medno-zolotorudnogo mestorozhdeniya Malmyzh i rezul'taty ikh geotekhnologicheskogo testirovaniya [Geochemical features of ores from the oxidation zone of the Malmyzh copper-gold deposit and the results of their geotechnological testing]. Gornyi zhurnal, № 10, P. 30-35.
8. Rasskazova A.V., 2019. Metody obogashcheniya bednykh zolotomednykh rud [Methods of enrichment of poor gold-copper ores]. Problemy nedropol'zovaniya, № 2 (21), P. 122-129.
9. Gurman M.A., Shcherbak L.I., 2023. Process Mineralogy of the Malmyzh Deposit. Journal of Mining Science, vol. 59(1), pp. 148–156. DOI: 10.1134/S1062739123010167.
10. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvinova N.M., Konareva T.G., Andryushchenko A.S., 2023. Sovershenstvovanie skhem dobychi i pererabotki rud pri osvoenii slozhno-strukturnykh mestorozhdeniy [Improvement of ore extraction and processing schemes in the

development of complex-structured deposits]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh is-kopaemykh*, № 2, P. 57-67.

11. Rasskazov I.Yu., Gurman M.A., Shcherbak L.I., 2023. The Genetic Features and Flotation Properties of Porphyry–Copper–Gold Ore (Malmyzh Deposit, Khabarovsk Krai, Russia). *Doklady Earth Sciences*. DOI: 10.1134/S1028334X23601748.

12. GOST 33207- 2014 Rudy medesoderzhashchie i polimetallicheskie i produkty ikh pererabotki. *Metody izmerenii massovoi doli medi v mineral'nykh formakh*. [Copper-containing and polymetallic ores and products of their processing. Methods for measuring the mass fraction of copper in mineral forms]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763516.pdf> (data obrashcheniya 10.06.2025).

13. NSAM-155-KhS-1 Metodika KKhA. *Opredelenie medi, tsinka, kadmiya, vismuta, sur'my, svintsa, kobal'ta, nikelya, zheleza i margantsa atomno-absorbtsionnym metodom v tverdykh sypuchikh materialakh* [KKhA methodology. Determination of copper, zinc, cadmium, bismuth, antimony, lead, cobalt, nickel, iron and manganese by atomic absorption method in solid bulk materials]. URL: <https://lepton.ru/GOST/Index2/1/4293753/4293753572.htm> (data obrashcheniya 10.06.2025).



ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 553.451+533.452

Дорошенко Екатерина Михайловна
младший научный сотрудник,
преподаватель,
Тихоокеанский государственный
университет,
685035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136
e-mail: 012232@togudv.ru

Рассказова Анна Вадимовна
старший преподаватель, доцент,
Тихоокеанский государственный
университет
e-mail: 011573@togudv.ru

Драпей Анатолий Витальевич*
младший научный сотрудник, лаборант,
Тихоокеанский государственный
университет
e-mail: 2021100489@togudv.ru

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ОЛОВЯННЫХ КОНЦЕНТРАТАХ**

Аннотация:

В связи с обостренной геополитической обстановкой в Российской Федерации олово является стратегическим металлом для промышленности. Особенно ценится чистое олово без вредных примесей. Оловосодержащие кварцево-сульфидные руды Фестивального и Перевального месторождений являются важным сырьевым источником для горнодобывающей промышленности Дальнего Востока и Российской Федерации в целом. Для полиметаллических руд, где олово представлено преимущественно касситеритом, существует проблема высокого содержания мышьяка, находящегося в основном в арсениопирите. Целью данной работы является обзор методов снижения мышьяка в оловянных концентратах для определения оптимального метода, обеспечивающего максимальное уменьшение его содержания в товарном концентрате. Для достижения поставленной цели был проведен обзор литературных источников по данной тематике, в результате чего в статье приведены основные методы доводки оловянных концентратов, действующие на данный момент, а также рассмотрены специальные методы доводки концентратов: различные виды обжига (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий); возгонки (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка); выщелачивания (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное). В данном исследовании перспективным решением для экологичного и эффективного разделения олова и мышьяка в высокомышьяковых концентратах является применение гидрометаллургического метода доводки.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.060

Doroshenko Ekaterina M.
Junior Researcher, lecturer,
Pacific National University
685035 Khabarovsk,
136 Tikhookeanskaya St.
e-mail: 012232@togudv.ru

Rasskazova Anna V.
Associate Professor, Senior lecturer,
Pacific National University
e-mail: 011573@togudv.ru

Drapey Anatoly V.
Junior Researcher, Laboratory assistant,
Pacific National University
e-mail: 2021100489@togudv.ru

METHODS OF REDUCING THE CONTENT OF HARMFUL IMPURITIES IN TIN CONCENTRATES

Abstract:

Due to the aggravated geopolitical situation in the Russian Federation, tin is a strategic metal for its industry. Pure tin without harmful impurities is especially valued. The recovery of pure tin from these ores is an urgent task that requires detailed studies on arsenic removal from these ores. In the concentrate of Solnechny mining and processing plant, where tin is represented mainly by cassiterite, there is a problem with the maximum allowable arsenic content in the marketable concentrate due to the content of arsenopyrite in the ore. The objective of this work is to review methods for reducing harmful arsenic in tin concentrates to determine the optimum method to maximize the reduction of arsenic in the saleable concentrate. To achieve this goal, a review of literature sources on the subject was conducted. On the basis of which this article presents the main methods of tin concentrate finishing currently in force, and also considers special methods of concentrate finishing: different types of roasting (oxidizing, redox, chlorinating); sublimation (fuming, chlorination at low and high temperatures, sulfide sublimation); leaching (acid, neutral, alkaline, bacterial) and sintering. In this study, the application of hydrometallurgical finishing method is a promising solution for environmentally friendly and efficient separation of tin and arsenic in high arsenic concentrates.

* Участие в исследовании в рамках проекта «Наставничество», Тихоокеанский государственный университет

** Исследование проводилось в ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «ТОГУ» при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках НИР № гос. рег. гос.з № FEME-2024-0006 Теоретическое и технологическое обоснование активационных воздействий в обогащательных и гидрометаллургических процессах переработки поликомпонентного минерального сырья.

Ключевые слова: гидрометаллургия, флотация, сепарация, олово, мышьяк, касситерит, арсенопирит.

Key words: hydrometallurgy, flotation, separation, tin, arsenic, cassiterite, arsenopyrite.

Введение

Оловосодержащие кварцево-сульфидные руды Фестивального и Перевального месторождений являются важным сырьевым источником для горнодобывающей промышленности. Несмотря на применение многоступенчатой комбинированной обогащательной схемы в связи со структурными и вещественными характеристиками исходной оловянной руды, сложно получить товарные продукты удовлетворительного качества. В связи с этим актуальна проблема снижения содержания вредных примесей в оловянных концентратах. Одной из нормируемых вредных примесей является мышьяк (табл. 1), ассоциированный с арсенопиритом. В случаях, когда применение действующей обогащательной схемы не позволяет достигнуть требуемых содержаний ценного компонента – олова и снизить до норматива концентрацию вредных примесей – мышьяка, требуется применение специальных методов доводки концентратов.

Актуальной задачей является получение оловянного товарного концентрата с наименьшим содержанием мышьяка. Данная задача требует проведения детальных исследований по доводке оловянных концентратов для снижения содержания мышьяка.

Целью данной работы является обзор методов снижения вредных примесей в оловянных концентратах. Для достижения поставленной цели был проведен обзор литературных источников.

Вредные примеси в оловянных рудах и методы их выделения

Обычно олово в природе представлено в двух основных минералах – касситерите и станнине. Так, в концентрате ГОК Солнечный, где олово представлено преимущественно касситеритом, существует проблема предельно высокого допустимого содержания мышьяка в товарном концентрате (~ 4,7 % As) при допустимом содержании мышьяка для такого концентрата в 5 % (см. табл. 1) [1].

Таблица 1

Нормируемые показатели химического состава оловянных концентратов

Марка концентрата	Название	Массовая доля, %		
		Sn, не менее	Примеси, не более	
			Pb	As
КО-1	концентрат оловянный	60	2	0,3
КО-1		45	2	0,3
КОЗ-1	концентрат оловянный зернистый	30	2	5
КОЗ-2		15	2	5
КОШ-1	концентрат оловянный шламовый	15	2	2
КОШ-2		8	2	1,5
КОШ-3		5	3	0,5
КОС-1	концентрат оловянно-свинцовый	15	5	2
КОС-2		8	5	1,5
КОС-3		5	—	0,5

На Солнечной обогатительной фабрике перерабатываются руды Фестивального и Перевального месторождений [2], характеризующиеся мелкой вкрапленностью ценного компонента (касситерита) и тонким взаимным проращением минералов и требующие применения комбинированных методов обогащения [3].

На фабрике применяется комбинированная гравитационно-флотационная многоступенчатая технология [4 – 5]. Гравитационное обогащение является основным процессом для переработки оловянных руд. Сульфидные минералы (преимущественно пирит, арсенопирит, халькопирит) выделяются во флотационном процессе в концентрат; оксидный минерал касситерит остается в камерном продукте и направляется на дальнейшие стадии обогащения. В отдельном цикле происходит разделение сульфидов методом селективной флотации с выделением халькопирита, продуктом данного цикла является медный концентрат.

К специальным методам доводки концентратов относятся обжиг (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий); возгонка (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка); выщелачивание (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное) и спекание.

По первому направлению – пирометаллургическому – перспективным является метод вакуумного восстановительного обжига с использованием антрацита (10 %) в качестве восстановителя для удаления мышьяка и извлечения олова из минеральных продуктов, характеризующихся высоким содержанием мышьяка (~8 %). Арсенат при вакуумном восстановительном обжиге переходит в As_2O_3 , который обладает лучшей летучестью, а касситерит (SnO_2) восстанавливается до SnO и Sn . При температуре обжига $750^\circ C$ и продолжительности 3 ч эффективность удаления мышьяка достигла 97 %, а степень восстановления олова составила 84,48 % [6].

При производстве олова основное количество (78 – 92 %) мышьяка концентрируется в газах обжиговых печей, в газах рафинирования чернового олова порядка 5 – 13 %, фьюминговании шлаков и электроплавке съёмов рафинирования от 2-х до 8-ми % и в газах электроплавки концентрата — 1–2 %. Технологические газы очищают последовательно в многокаскадной схеме пылеулавливания. Высокотемпературный режим очистки газов при фьюминговании бедного оловянного сырья с повышенным содержанием мышьяка позволяет получать оловянные возгоны, пригодные для пирометаллургической переработки [7 – 9]. Для селективного и глубокого (92 – 96 %) извлечения мышьяка из фьюминговых возгонов оловопроизводства существует метод щелочного выщелачивания при концентрации $NaOH$ 100 – 150 г/дм³, $T:Ж=1:5-10$, $80-100^\circ C$, продолжительности 1–2 ч и стехиометрического расхода Na_2S для связывания свинца и цинка в сульфиды [7].

При фьюминговании оловосодержащих шлаков олово удаляется в виде летучего сульфида (SnS). Касситерит (SnO_2) сначала превращается в Sn , а затем – в сульфид олова (SnS). Соответственно, применение фьюминга для оловосодержащих материалов требует введения сульфидизатора ($CaSO_4 \cdot FeS_2(FeS)$) [10 – 11].

Вторым направлением доводки концентратов является гидрометаллургическое, то есть выщелачивание вредных примесей с переводом их в растворимое состояние при сохранении основного ценного компонента – касситерита в исходной форме. Химическое выщелачивание основано на высокой химической стойкости касситерита, который практически не растворим даже в концентрированных горячих растворах сильных кислот, сильных оснований, окислителей и восстановителей. Примеси, не обладающие такой устойчивостью, под действием растворителей переходят в раствор.

Выщелачивание применяют в случаях невозможности отделения вредных примесей способами обогащения. Некоторые минералы-примеси находятся в концентратах в виде весьма прочных сростков с касситеритом, причем взаимное проращение минералов бывает настолько тонким, что измельчение нежелательно, так как оно привело

бы к значительному образованию шламов, которые затрудняют их сгущение, фильтрацию и вызывают повышенные потери олова.

Кислотное выщелачивание мышьяка из арсенопирита может осуществляться раствором азотной кислоты с нитратом калия [12 – 14]. Причем нитрат калия играет роль дополнительного окислителя, необходимого для перевода сульфидов в растворимое состояние. В работах Н.Н. Мурача показано, что наилучшим растворителем примесей касситерита является соляная кислота. Разбавленная 1:4, она выщелачивает, например, мышьяк на 97 %. Даже более разбавленная соляная кислота при повышении температуры до 60 – 135°C улучшает растворение мышьяка.

В связи с упорностью сульфидных минералов к выщелачиванию при обогащении оловянных руд процесс проводят в условиях повышенной температуры или давления. Так называемое автоклавное выщелачивание характеризуется более высокой скоростью и эффективностью. Роль окислителя играет кислород, дополнительно поступающий в автоклав.

Помимо кислотного, для удаления мышьяка применяют щелочное выщелачивание. Данный процесс также эффективнее протекает в автоклаве с дополнительным вводом кислорода [15].

Ранее для вскрытия сульфидных минералов применялись технологии обжига. Перед выщелачиванием сульфидных концентратов их обжигали, чтобы при высокой температуре и доступе атмосферного кислорода окислить сульфидные минералы, переводя их в легкорастворимую окисленную форму [16]. Данный метод сопряжен с выделением большого количества сернистых газов, являющихся ядовитыми. При обжиге арсенопирита происходит также перевод мышьяка в токсичные газообразные формы. Обжиговые пыли являются еще одним фактором, требующим тщательного улавливания и способным нанести ущерб окружающей среде. В связи с вышеперечисленными причинами, обжиговые технологии все больше замещаются технологиями автоклавного окисления, отличающимися сниженным отрицательным влиянием на окружающую среду. Переработка обжиговых пылей технологически проще по сравнению с исходными концентратами, так как вредные примеси находятся в данных продуктах в форме окислов, а не в сульфидах [17 – 21].

Третьим направлением снижения массовой доли мышьяка за счет разложения и удаления арсенопирита является биовыщелачивание. Тионовые (автотрофные) бактерии широко применяются, в частности, для удаления мышьяка из промпродуктов и концентратов. Для интенсификации процесса выщелачивания сульфидных минералов в сернокислотных растворах широко применяются микроорганизмы. Благодаря бактериальному выщелачиванию возможно извлекать не только полезные компоненты, но и вредные примеси (мышьяк) [22].

Существует большое разнообразие методов доводки оловянных концентратов, среди которых можно выделить пиро-, гидро- и биометаллургическое.

Пирометаллургическое направление имеет очевидные негативные экологические аспекты применения данного типа технологий. Технологии возгонки сульфидных соединений олова в литературе упоминаются в качестве методов доводки концентратов. В то же время указано, что фьюмингом целесообразно обрабатывать продукты с содержанием олова от 2 до 5 %, что явно ниже содержания олова в концентратах. Граничные содержания мышьяка для переработки концентратов должны соответствовать ГОСТ Р 59138-2020, что снова возвращает нас к проблеме снижения мышьяка до пирометаллургического предела.

Бактериальное выщелачивание требует поддержания температуры пульпы. При низких температурах бактерии, окисляющие сульфиды, погибают. При взрывном росте колонии бактерий и активном окислении сульфидов выделяется большое количество тепла, также способное уничтожить колонию бактерий. Таким образом, необходимо

тщательно следить за температурным режимом окисляемой минеральной массы для поддержания процесса биоокисления, требующего также значительного времени.

Выводы

Был проведен обзор литературных источников по методам снижения содержания вредных примесей в концентратах, в результате чего приведены основные методы доводки оловянных концентратов. Также рассмотрены специальные методы доводки концентратов:

- различные виды обжига (окислительный, окислительно-восстановительный, хлорирующий);
- возгонки (фьюмингование, хлорирование при низких и высоких температурах, сульфидовозгонка);
- выщелачивания (кислотное, нейтральное, щелочное, бактериальное).

В данном исследовании авторы видят оптимальный метод для экологичного и эффективного разделения олова и мышьяка в высокомышьяковых концентратах – применение гидрометаллургического метода доводки.

Список литературы

1. ГОСТ Р 59138. Концентрат оловянный. Технические условия, 2020, 13 с. URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/752/75274.pdf?ysclid=mbyxqp3j4u351570115> (дата обращения: 6.06.2025).
2. ПАО «Русолово». URL: <https://rus-olovo.ru/company/ork/about/> (дата обращения 20.04.2025).
3. Дорошенко Е.М., Рассказова А.В., 2024. Перспективные направления повышения качества комплексных оловянных концентратов. *Сборник конференции «Плаксинские чтения – 2024», Аналиты*, С. 79-82 doi:10.37614/978-5-91137-523-2.
4. Liao X., Chen Y., Chen J., 2022. Application of macromolecular organic polymer S-7261A in arsenic removal by flotation of refractory mixed copper ore. *Minerals Engineering*, Vol. 182, Article 107560.
5. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., 2019. Разработка метода селективной флотации сульфидов сурьмы и мышьяка при обогащении комплексных золото-содержащих руд. *Цветные металлы*, № 4, С. 6-12. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.01.
6. Zhen Yang, Tongda Deng, Huan Luo, Xianjun Lei, Baoqiang Xu, Wenlong Jiang, Bin Yang, 2024. Removal of arsenic and recovery of tin from arsenic-containing multi-metallic materials by vacuum reduction roasting. *Vacuum*, Vol. 226, Article 113332.
7. Лебедев Б.Н., Авдюков В.И., Владимирев В.П., 1974. *Комбинированные и специальные методы обогащения и переработки полезных ископаемых*. Учеб. пособие для студентов специальности "Обогащение полезных ископаемых". Алма-Ата, 204 с.
8. Копылов Н.И., 2012. Проблема мышьякосодержащих отходов металлургии тяжелых цветных металлов и их минимизации. *Химия*, № 2, С. 31-35
9. Болатбаев К.Н., Набойченко С.С., Садыков С.Б., 2004. *Флотационно-металлургическая переработка труднообогатимых руд*. Петропавловск: СКГУ, 401 с.
10. Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang, 2022. Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, Article 102545. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102545>.
11. Zibin Zuo et al., 2024. Separation of arsenic and antimony: A comprehensive theoretical and experimental study. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 31. pp. 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.069>.
12. Патент SU 1314692 Российская Федерация, МПК C22B 30/04. *Способ выщелачивания мышьяка из пирит-арсенопиритных золотосодержащих концентратов* / Р.И. Новоселов, Е.В. Макотченко, Л.К. Чучалин, Л.Ф. Атеева, А.В. Костров, Г.И. Новоселова – заявл 05.06.1995, опубл. 10.11.1998 г.

13. Дорошенко Е.М., Ким Е.Д., Рассказова А.В., Ри Э.Х., 2023. Исследование фазового состава промежуточного продукта обогащения с последующим моделированием составов солей калия и натрия для разложения арсенопирита. *Вопросы материаловедения*, Т. 114, № 2, С. 113-124.
14. Дорошенко Е.М., Рассказова А.В., Ким Е.Д., Паньшин И.О., 2023. Комплексное исследование воздействия нитратов калия и натрия на арсенопирит в промежуточном продукте обогащения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12-2, С. 40-52.
15. Пат. 2081924 Российская Федерация, МПК C22B 11/00. *Способ удаления мышьяка из концентратов благородных металлов* / М.А. Спиртус, В.В. Коблов, А.Г. Ситнов, Э.М. Тимошенко, В.И. Корсунский, А.А. Цваров – заявл. 23.08.1995, опубл. 20.06.1997.
16. Гурман М.А., Щербак Л.И., Рассказова А.В., 2015. Извлечение золота и мышьяка из продуктов обжига упорных пирит-арсенопиритовых концентратов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 145-150.
17. Gu K., Liu W., Han J. et al., 2019. Arsenic and antimony extraction from high arsenic smelter ash with alkaline pressure oxidative leaching followed by Na₂S leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 222, p. 53-59.
18. Gu K., Li W., Han J. et al., 2019. Arsenic removal from lead-zinc smelter ash by NaOH-H₂O₂ leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 209, p. 128-135.
19. Li G., Jirong L., Yaguang D. et al., 2020. Microwave-enhanced selective leaching of arsenic from copper smelting flue dusts. *J Hazard Mater*, Vol. 386, Article 121964.
20. Cheng R., Zhang H., Ni H., 2019. Arsenic removal from arsenopyrite-bearing iron ore and arsenic recovery from dust ash by roasting method. *Processes*, № 7, Vol 754, 12 p.
21. Tan C., Li L., Zhong D. et al., 2018. Separation of arsenic and antimony from dust with high content of arsenic by a selective sulfidation roasting process using sulfur. *Trans Nonferrous Metals Soc. China*, № 28, p. 27-35.
22. Полькин С.И., Лаптев С.Ф., 1974. *Обогащение оловянных руд и россытей*. Москва: Недра, 480 с.

References

1. GOST R59138. Kонтсентрат оловянный. Tekhnicheskie usloviya, 2020, 13 p. [Tin concentrate. Technical specifications, 2020, 13 p.] URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/752/75274.pdf?ysclid=mbyxqp3j4u351570115> (data obrashcheniya: 6.06.2025).
2. PAO "Rusolovo" [PJSC Rusolovo]. URL: <https://rus-olovo.ru/company/ork/about/> (data obrashche-niya 20.04.2025).
3. Doroshenko E.M., Rasskazova A.V., 2024. Perspektivnye napravleniya povysheniya kachestva kompleksnykh olovяannykh kontsentratov [Promising areas for improving the quality of complex tin concentrates]. Sbornik konferentsii "Plaksinskie chteniya – 2024", Apatity, P. 79-82 doi: 10.37614/978-5-91137-523-2.
4. Liao X., Chen Y., Chen J., 2022. Application of macromolecular organic polymer S-7261A in arsenic removal by flotation of refractory mixed copper ore. *Minerals Engineering*, Vol. 182, Article 107560.
5. Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B., 2019. Razrabotka metoda selektivnoi flotatsii sul'fidov sur'my i mysh'yaka pri obogashchenii kompleksnykh zoloto-soderzhashchikh rud [Developing a method for selective flotation of antimony and arsenic sulfides in the processing of complex gold-bearing ores]. Tsvetnye metally, № 4, P. 6-12. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.01.
6. Zhen Yang, Tongda Deng, Huan Luo, Xianjun Lei, Baoqiang Xu, Wenlong Jiang, Bin Yang, 2024. Removal of arsenic and recovery of tin from arsenic-containing multi-metallic materials by vacuum reduction roasting. *Vacuum*, Vol. 226, Article 113332.

7. Lebedev B.N., Avdyukov V.I., Vladimirov V.P., 1974. Kombinirovannye i spetsial'nye metody obogashcheniya i pererabotki poleznykh iskopaemykh [Combined and special methods of enrichment and processing of useful minerals]. Ucheb. posobie dlya studentov spetsial'nosti "Obogashchenie poleznykh iskopaemykh". Alma-Ata, 204 p.
8. Kopylov N.I., 2012. Problema mysh'yakosoderzhashchikh otvalov metallurgii tyazhelykh tsvetnykh metallov i ikh minimizatsii [On the metallurgy problem of arsenic-containing landfills of heavy non-ferrous metals and their minimization]. Khimiya, № 2, P. 31-35
9. Bolatbaev K.H., Naboichenko C.C., Sadykov S.B., 2004. Flotatsionnometallurgicheskaya pererabotka trudnoobogatimyykh rud [Flotation and onometallurgical processing of hard-to-enrich ores]. Petropavlovsk: SKGU, 401 p.
10. Yufeng Guo, Jianfa Jing, Feng Chen, Shuai Wang, Lingzhi Yang, 2022. Selective separation of tin from tin-bearing middling via sulfur roasting. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, Article 102545. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102545>.
11. Zibin Zuo et al., 2024. Separation of arsenic and antimony: A comprehensive theoretical and experimental study. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 31. pp. 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.069>.
12. Patent SU 1314692 Rossiiskaya Federatsiya, MPK S22V 30/04. Sposob vyshchelachivaniya mysh'yaka iz pirit-arsenopiritnykh zolotosoderzhashchikh kontsentratorov [Patent SU 1314692 Russian Federation, МПК C22B 30/04. A method for leaching arsenic from pyrite-arsenopyrite gold-bearing concentrates] / R.I. Novoselov, M.E. Vakotchenko, L.K. Chuchalin, L.F. Ateeva, A.V. Kostrov, G.I. No-voselova – заявл 05.06.1995, opubl. 10.11.1998 g.
13. Doroshenko E.M., Kim E.D., Rasskazova A.V., Ri E.Kh., 2023. Issledovanie fazovogo sostava promezhutochnogo produkta obogashcheniya s posleduyushchim modelirovaniem sostavov soley kaliya i natriya dlya razlozheniya arsenopirita [Investigation of the phase composition of the intermediate enrichment product with the following modeling of the compositions of potassium and sodium salts for the decomposition of arsenopyrite]. *Voprosy materialovedeniya*, Vol. 114, № 2, P. 113-124.
14. Doroshenko E.M., Rasskazova A.V., Kim E.D., Pan'shin I.O., 2023. Kompleksnoe issledovanie vozdeistviya nitratov kaliya i natriya na arsenopirit v promezhutochnom produkte obogashcheniya [A comprehensive study of the effects of potassium and sodium nitrates on arsenopyrite in an intermediate enrichment product]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12-2, P. 40-52.
15. Pat. 2081924 Rossiiskaya Federatsiya, MPK S22V 11/00. Sposob udaleniya mysh'yaka iz kontsentratorov blagorodnykh metallov [Pat. 2081924 Russian Federation, МПК C22B 11/00. A method for removing arsenic from concentrates of precious metals] / M.A. Spirtus, V.V. Koblov, A.G. Sitnov, E.M. Timoshenko, V.I. Korsunskii, A.A. Tsvarov – заявл. 23.08.1995, opubl. 20.06.1997.
16. Gurman M.A., Shcherbak L.I., Rasskazova A.V., 2015. Izvlechenie zolota i mysh'yaka iz produktov obzhiga upornykh pirit-arsenopiritovykh kontsentratorov [Extraction of gold and arsenic from firing products of resistant pyrite-arsenopyrite concentrates]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 145-150.
17. Gu K., Liu W., Han J. et al., 2019. Arsenic and antimony extraction from high arsenic smelter ash with alkaline pressure oxidative leaching followed by Na₂S leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 222, p. 53-59.

18. Gu K., Li W., Han J. et al., 2019. Arsenic removal from lead-zinc smelter ash by NaOH-H₂O₂ leaching. *Separ Purif Technol*, Vol. 209, p. 128–135.
19. Li G., Jirong L., Yaguang D. et al., 2020. Microwave-enhanced selective leaching of arsenic from copper smelting flue dusts. *J Hazard Mater*, Vol. 386, Article 121964.
20. Cheng R., Zhang H., Ni H., 2019. Arsenic removal from arsenopyrite-bearing iron ore and arsenic recovery from dust ash by roasting method. *Processes*, № 7, Vol 754, 12 p.
21. Tan C., Li L., Zhong D. et al., 2018. Separation of arsenic and antimony from dust with high content of arsenic by a selective sulfidation roasting process using sulfur. *Trans Nonferrous Metals Soc. China*, № 28, p. 27–35.
22. Pol'kin S.I., Laptev S.F., 1974. Obogashchenie olovyannykh rud i rossypei [Enrichment of tin ores and placers]. Moscow: Nedra, 480 p.



ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 622.83:550.34.016

Романевич Кирилл Викторович

ведущий научный сотрудник,
кандидат технических наук,
Научно-исследовательский институт горной
геомеханики и маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр «ВНИМИ»,
199106, г. Санкт-Петербург,
22-я линия ВО, д.3, корп.1;
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирского отделения Российской академии наук,
630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54
e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Мороз Никита Евгеньевич

научный сотрудник,
лаборатория геофизических исследований,
Научно-исследовательский институт горной
геомеханики и маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр «ВНИМИ»,

Иванов Дмитрий Алексеевич

инженер,
лаборатория геофизических исследований,
Научно-исследовательский институт горной
геомеханики и маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр «ВНИМИ»,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМОСОБЫТИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

Аннотация:

Целью настоящей работы является разработка алгоритма оценки влияния сейсмособытий на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в процессе ведения горных работ. Работа алгоритма заключается в расчете исходной геомеханической модели массива горных пород, которая описывает начальное НДС массива. При возникновении сейсмического события в массиве система сейсмического мониторинга фиксирует его координаты и энергию. На основе этих данных с учетом воздействия события на массив выполняется корректировка геомеханической модели в соответствии с разработанной процедурой. После корректировки производится расчет обновленного НДС массива, что позволяет перейти к актуализированной геомеханической модели. По этой схеме осуществляется непрерывная оценка риска возникновения опасных проявлений горного давления, что обеспечивает прогнозирование и предотвращение потенциальных аварийных ситуаций.

В настоящей статье описан способ учета влияния сейсмического события на НДС породного массива вблизи горной выработки. Проведено моделирование параметров очага сейсмособытия и моделирование массива горных пород с выработкой. Проведенный анализ результатов моделирования и расчета показывает, что максимальные отклонения главных напряжений (σ_3) в массиве горных пород зависят от объема очага сейсмособытия, его расположения относительно

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.069

Romanevich Kirill V.

Research Institute of Mining Geomechanics
and Mine Surveying –
Interdisciplinary Research Center «VNIMI»,
St. Petersburg;
Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of RAS,
Novosibirsk
e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Moroz Nikita E.

Research Institute of Mining Geomechanics
and Mine Surveying –
Interdisciplinary Research Center «VNIMI»,

Ivanov Dmitry A.

Research Institute of Mining Geomechanics
and Mine Surveying –
Interdisciplinary Research Center «VNIMI»,

MODELING THE IMPACT OF SEISMIC EVENTS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A ROCK MASS DURING MINING OPERATIONS

Abstract:

In several mines in Russia, a seismic activity catalog is being compiled using the GITS seismic monitoring system, which continuously records seismic events and calculates their focal coordinates and energy. Underground mining operations can generate dozens to hundreds of seismic events of varying energy per day.

This study aims to develop an algorithm for assessing the impact of seismic events on the stress-strain state (SSS) of rock masses during mining. The algorithm first calculates an initial geomechanical model describing the rock mass's SSS. When a seismic event occurs, the system records its coordinates and energy, updating the geomechanical model accordingly. This adjustment enables continuous risk assessment of hazardous rock pressure manifestations, aiding in accident prevention.

This article describes a method for taking into account the influence of a seismic event on the stress-strain state of a rock mass near a mine working. The parameters of the seismic event source and the rock mass with a working were modeled. The analysis of the modeling and calculation results shows that the maximum deviations of the main stresses (σ_3) in the rock mass depend on the volume of the seismic event source, its location relative to the working (sideways or from above) and the level of reduction in the elastic-strength properties of the massif during modeling; the degree of these dependencies must be further clarified.

The study outlines future research directions, empha-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>.

выработки (сбоку или сверху) и уровня снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании, степень этих зависимостей необходимо уточнить дополнительно.

В статье определены перспективные направления дальнейших исследований, подчеркивается, что развитие данного подхода позволит повысить эффективность управления геомеханическими рисками при подземной разработке месторождений.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмособытие, сейсмомониторинг, численное моделирование, GITS, Fidesys.

sizing that this approach can improve geomechanical risk management in underground mining.

Key words: rock mass, stress-strain state, seismic event, seismic monitoring, numerical modeling, GITS, Fidesys.

Введение

Поле напряжений массива горных пород, имеющего блочное строение, является неоднородным. Исследованиями напряженно-деформированного состояния (НДС) тектонически нарушенных массивов устанавливается, что в отдельных блоках существует повышенный или пониженный уровень напряжений, ряд блоков характеризуется наличием зон повышенной концентрации напряжений, где возможны опасные проявления горного давления в пределах горных выработок.

При увеличении глубин горных работ и объемов выработанных пространств отмечается осложнение геомеханической и геодинамической обстановки, в ряде случаев возрастает сейсмическая активность массива. В свою очередь проводимые технологические взрывы и возникающие в массиве природные сейсмические события (толчки, микроудары и др.) оказывают влияние на перераспределение НДС породного массива: под их воздействием может происходить как разгрузка массива, так и, наоборот, рост напряжений на некоторых участках. Перечисленные факторы увеличивают риск возникновения опасных проявлений горного давления и различных форм разрушения горных выработок.

В рамках научно-исследовательских работ различных коллективов разрабатываются комплексные критерии удароопасности для отдельных участков массива горных пород, в том числе путем оценки НДС массива (численное моделирование НДС) по долгосрочным данным сейсмомониторинга [1, 2].

Так, в работе [1] «представлены результаты исследования изменений сейсмичности массива горных пород за восьмилетний период мониторинга на участке месторождения со сложными горно-геологическими условиями при развитии горных работ, которые проводятся одновременно на нескольких горизонтах, а также проведено сопоставление сейсмических данных с расчетными характеристиками действующего поля напряжений» – активизация сейсмичности характеризуется как отражение процесса перераспределения напряжений, происходящего под влиянием горных работ. Вместе с тем отмечается, что зачастую высокий уровень сейсмичности не оказывает влияния на устойчивое состояние массива, что вызывает определенные сложности при прогнозе удароопасности. Кроме того, такой подход позволяет выполнять оценку возможного изменения НДС в среднесрочной и долгосрочной постановке, т.к. для анализа необходима аккумуляция представительной статистики по произошедшим сейсмособытиям.

Целью данной работы является разработка алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ. На первом этапе данного исследования были поставлены следующие задачи:

- создание модели участка массива;
- моделирование параметров очага сейсмособытия;
- оценка изменения НДС участка массива по результатам численного моделирования в зависимости от параметров сейсмособытий.

Регистрация сейсмических событий в массиве горных пород

Шахтная сейсмология изучает процессы упругой и пластической деформации горных пород, вызванные горными выработками. Упругая деформация характеризуется перемещением существующих микродефектов без их увеличения, тогда как пластическая деформация связана с разрушением и трением при скольжении, что приводит к катакластическому течению и излучению сейсмических волн. Амплитуда и частота этих волн зависят от прочности породы, уровня напряжений, размера источника и скорости деформации [3, 4].

Сейсмическое событие любой энергии представляет собой процесс перехода энергии упругих деформаций породного массива в кинетическую энергию колебаний. Как следствие, НДС в области очага должно измениться. При этом сама очаговая область разгружается от напряжений, а окружающий ее массив будет испытывать пригрузку вследствие перераспределения напряжений.

В соответствии с требованиями нормативной документации (ФНП № 505 и № 507) при отработке угольных и рудных месторождений необходимо осуществлять деятельность, направленную на предотвращение опасных проявлений горного давления (заколообразование и др.), а при ведении работ на удароопасных и склонных к горным ударам месторождениях – динамических явлений в шахтах (таких как горные удары, внезапные выбросы угля (породы) и газа, внезапные выдавливания угля, внезапные динамические разрушения пород почвы и др.). Для решения данных задач применяется широкий спектр видов прогноза динамических явлений, в том числе региональный прогноз по данным, полученным при ведении разведочных работ, являющийся основой геомеханического моделирования, и прогноз по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям.

Для организации сейсмических наблюдений шахта должна оснащаться системой сейсмического мониторинга. Широкое распространение на глубоких шахтах и рудниках России находит система «GITS» (разработана и произведена в АО «ВНИМИ») [7, 8]. Датчики системы устанавливаются в подземных выработках вокруг контролируемых участков шахтного поля. Результатом непрерывной работы такой системы является регистрация сейсмических событий и последующий расчет координат очага и энергии каждого события.

С течением времени формируется каталог сейсмической активности. Пространственное распределение очагов событий по шахтному полю и особенности их проявлений во времени позволяют выделять «зоны удароопасности», требующие контроля, уточнения напряженного состояния инструментальными методами и мероприятий по разгрузке породного массива.

Количество регистрируемых сейсмособытий при подземной разработке месторождений достигает десятков и иногда даже сотен событий различной энергии в сутки, на рис. 1 приведена статистика по сейсмособытиям на некоторых шахтах и рудниках РФ за один месяц.

Каждое происходящее в пределах горного отвода сейсмособытие тем или иным образом изменяет НДС массива, оперативный учет таких изменений позволит корректировать геомеханическую модель в реальном времени, что обеспечит более точное прогнозирование опасных проявлений горного давления, таких как горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, а также других динамических явлений. Внедрение алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ в систему сейсмического мониторинга способствует снижению риска аварийных ситуаций, минимизации экономических потерь и повышению устойчивости горных выработок, что особенно актуально при освоении удароопасных и склонных к горным ударам месторождений. Принципиальная схема алгоритма показана на рис. 2.

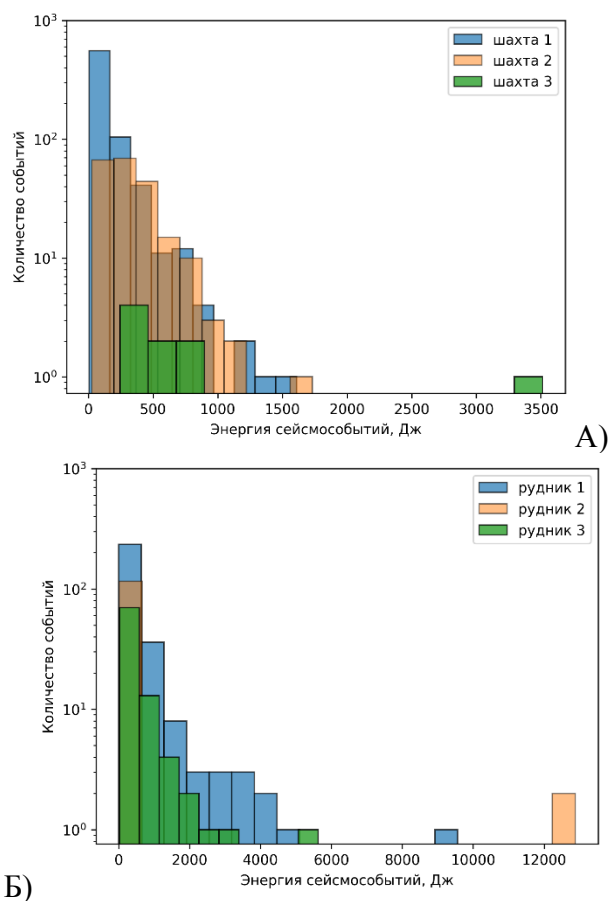


Рис. 1. Сейсмособытия, зарегистрированные системой «GITS» за один месяц на некоторых шахтах РФ (А) и на некоторых рудниках РФ (Б)

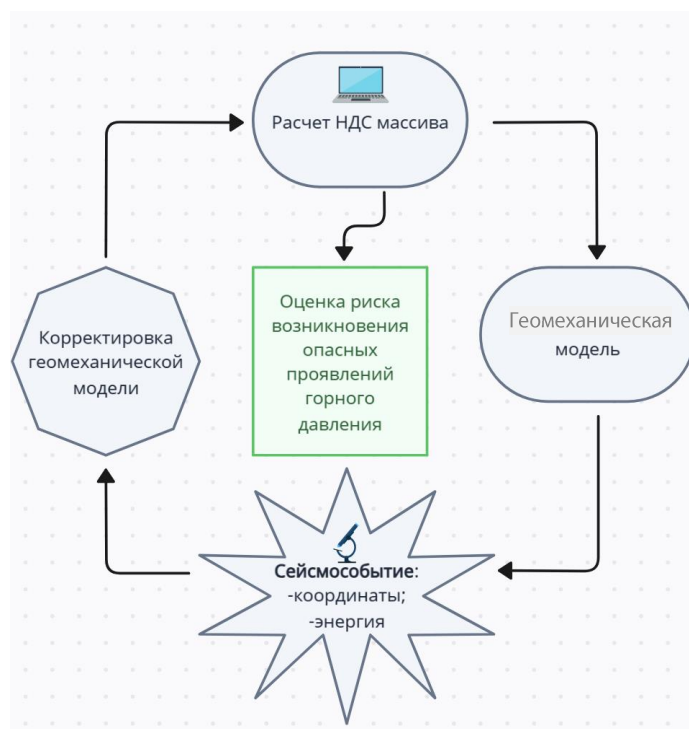


Рис. 2. Схема алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ

Работа алгоритма заключается в расчете исходной геомеханической модели массива горных пород, которая описывает начальное НДС массива. При возникновении сейсмического события в массиве система сейсмического мониторинга фиксирует его координаты и энергию. На основе этих данных, с учетом воздействия события на массив, выполняется корректировка геомеханической модели в соответствии с разработанной процедурой. После корректировки производится расчет обновленного НДС массива, что позволяет перейти к актуализированной геомеханической модели. На основе этой модели осуществляется непрерывная оценка риска возникновения опасных проявлений горного давления, что обеспечивает прогнозирование и предотвращение потенциальных аварийных ситуаций.

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо выполнить моделирование параметров очага сейсмособытия и моделирование массива горных пород.

Моделирование параметров очага сейсмособытия

Возникающие в массиве горных пород сейсмические события (микроудары, горные, горно-тектонические удары, техногенные землетрясения) влияют на перераспределение НДС массива, вызывая либо разгрузку, либо рост напряжений на отдельных участках.

Очаг сейсмособытия представляет собой зону деформации массива, которая может быть охарактеризована объемом разрушенного материала. Размеры этой зоны имеют прямую зависимость от выделенной сейсмической энергии и могут быть определены на основе данных о местоположении и параметрах сейсмособытия. В литературе приводятся различные эмпирические зависимости между энергией сейсмособытия и объемом очага. Зависимость между энергией E и объемом очага V выражается формулой [5]:

$$E = 0,27 \cdot (10^{-2}) \cdot (V^{1,8}). \quad (1)$$

Данное соотношение свидетельствует о нелинейной зависимости между энергией и объемом, где увеличение объема очага приводит к экспоненциальному росту выделенной энергии. Зависимость имеет следующий вид [6]:

$$E = 10^2 \cdot V. \quad (2)$$

Здесь выражена линейная зависимость, где энергия пропорциональна объему очага. Это упрощенная модель, которая может применяться для определенных условий, но не учитывает более сложные механизмы в массиве горных пород.

В работе [9] приводятся экспериментальные данные, показывающие, что при землетрясениях и подземных взрывах плотность сейсмической энергии (E_c) и объемы источников упругих сейсмических волн (V_c) близки и практически описываются выражением

$$\lg E_c = \lg V_c + 3. \quad (3)$$

В работах [10, 11] оценку объема V (м^3) зоны разрушения при горном ударе энергией E (Дж) предлагается выполнять по формуле

$$V = 3 \cdot 10^{-2} \cdot E. \quad (4)$$

После оценки параметров очага (его положения в массиве, энергии и объема зоны разрушения) может быть осуществлен пересчет НДС всего массива горных пород или его участка с учетом деформированной области с целью прогнозирования дальнейшего поведения системы под воздействием последующих горных работ или сейсмических событий. Влияние деформированной зоны на окружающий массив проявляется в перераспределении напряжений, что может приводить к дополнительным смещениям, деформациям или возникновению новых очагов разрушения.

В настоящей работе для моделирования влияния сейсмособытий на НДС массива горных пород были выбраны три значения объема очага сейсмособытий 125,

1000 и 3375 м³, что по (4) соответствует энергиям 4, 33 и 112 кДж. Область сейсмособытия моделировалась условно в виде куба с размерами сторон 5, 10 и 15 м в зависимости от принятой расчетной схемы. В пределах куба производилось уменьшение упруго-прочностных показателей породы в 10 и 100 раз относительно характеристик нетронутого массива.

Моделирование массива горных пород с выработкой

Моделирование проходки выработки в массиве горных пород производилось в программном комплексе «Fidesys» [12 – 14]. Задача решалась в упруго-пространственной постановке.

Массив представлен скальной горной породой со следующими характеристиками: модуль упругости – 50 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,25; плотность – 2700 кг/м³. Выработка моделировалась сводчатой формы, высотой и шириной 5 м. Относительно данной выработки рассматривались различные варианты формирования зоны сейсмособытия. Область сейсмособытия располагается от выработки на расстоянии 5 м. Зона сейсмособытия в зависимости от расчетной схемы моделировалась сбоку или сверху относительно выработки.

Размеры модели в высоту, длину и ширину составляют 300 м. По поверхности модели было задано давление в 8 МПа, а также учтен вес пород в самой модели с помощью задания гравитационных сил. По приложенным нагрузкам и геометрии модели можно сказать, что проходка выработки осуществляется на глубине около 450 м. По боковым и нижней граням модели заданы граничные условия, запрещающие их поступательное перемещение.

Для сопоставления полученных результатов была также рассмотрена горная выработка без учета формирования сейсмособытия (рис. 3).

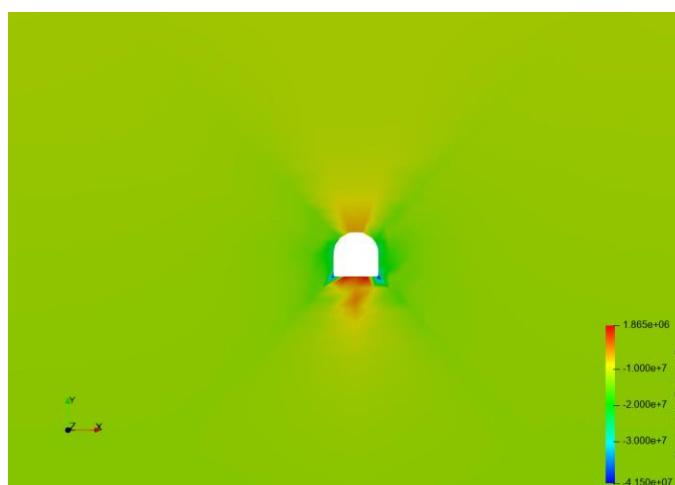


Рис. 3. Распределение напряжений σ_3 в окрестности горной выработки по результатам моделирования (в программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными)

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе было рассмотрено три значения объема очага – три значения ребра куба, которым моделировалось сейсмособытие (5, 10 и 15 м), сейсмособытия моделировались в двух направлениях – в стороне от выработки и над выработкой, на расстоянии 5 м. Рассматривалось два варианта снижения упруго-прочностных свойств области сейсмособытия – в 10 и в 100 раз.

На рис. 4 представлены некоторые результаты моделирования и расчета влияния сейсмособытия на массив горных пород с выработкой.

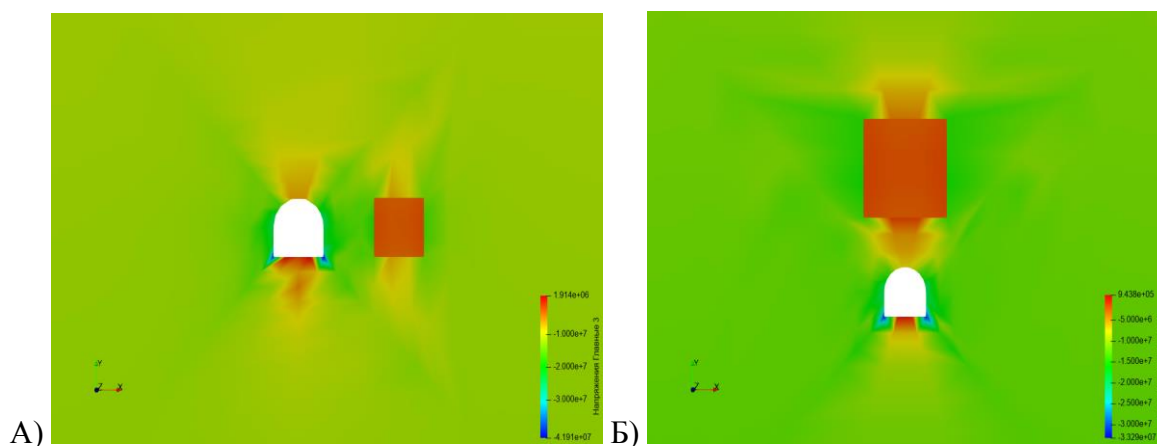


Рис. 4. Распределение напряжений σ_3 в окрестности горной выработки и очага сейсмособытия по результатам моделирования
(А – сейсмособытие в стороне от выработки, размер ребра куба 5 м;
Б – сейсмособытие над выработкой, размер ребра куба 10 м)
(в программном комплексе «Fidesys» напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными)

Расчетом установлено, что существенное изменение НДС массива горных пород наблюдается на границе рассматриваемой области сейсмособытия, где происходит резкий скачок напряжений, после которого наблюдается спад напряжений и разгрузка массива в зоне сейсмособытия. Изменение НДС наблюдается на всем участке массива между контуром горной выработки и границей сейсмособытия, а также с противоположной стороны от сейсмособытия (рис. 5 – 6).

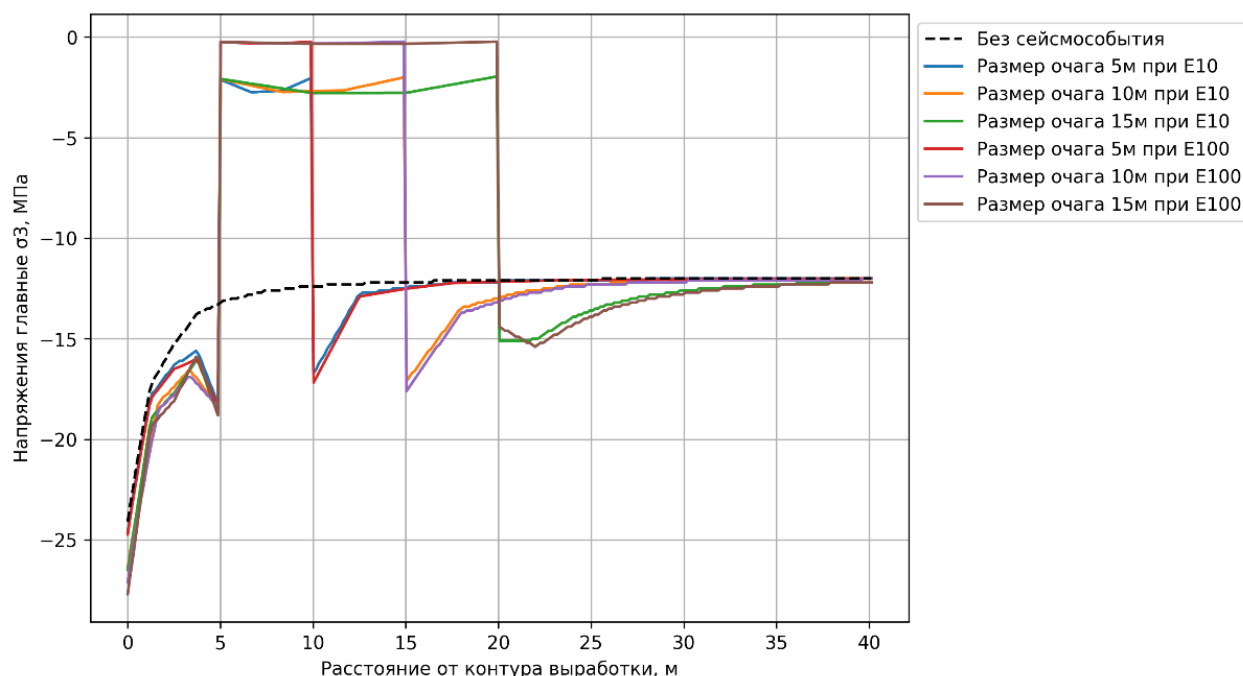


Рис. 5. Распределение главных напряжений (σ_3) при снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз (E10) и в 100 раз (E100) в зависимости от размера области сейсмособытия (очаг сейсмособытия находится сбоку от выработки на расстоянии 5 м)

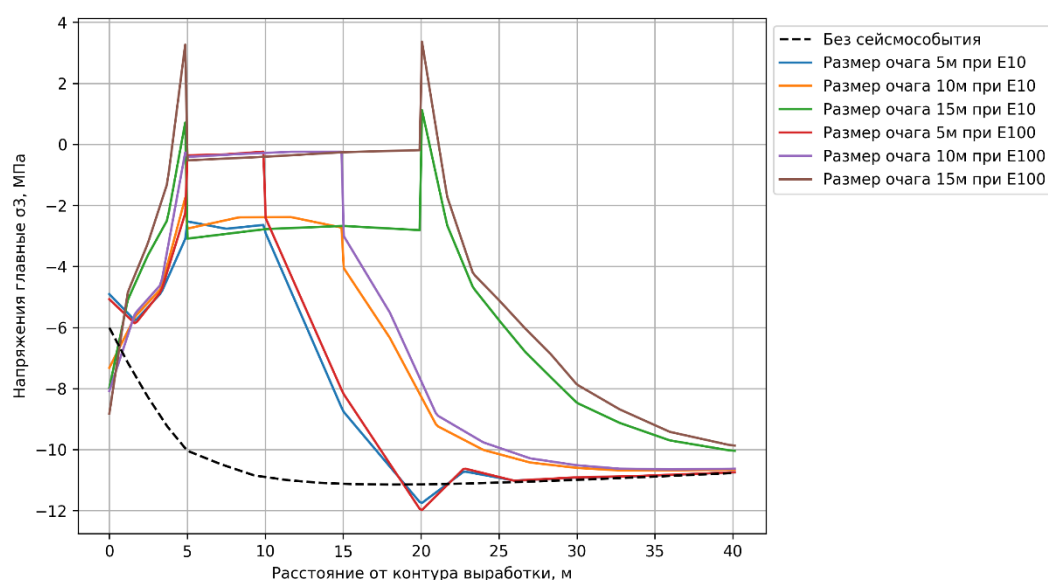


Рис. 6. Распределение главных напряжений (σ_3) при снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз (E10) и в 100 раз (E100) в зависимости от размера области сейсмособытия (очаг сейсмособытия находится над выработкой на расстоянии 5 м)

На рис. 5 – 6 напряжения сжатия характеризуются отрицательными величинами, а растяжения – положительными.

Максимальные абсолютные отклонения главных напряжений (σ_3) в окрестности горной выработки для объемов очагов сейсмособытия, равных 125, 1000 и 3375 м³, составляют 11,08, 11,11 и 11,12 МПа, соответственно, при расположении сейсмособытия сбоку от выработки и снижения упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз. При снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 100 раз – те же параметры при соответствующих объемах очагов сейсмособытий составляют 12,96, 12,97 и 12,96 МПа.

Максимальные абсолютные отклонения главных напряжений (σ_3) в окрестности горной выработки для объемов очагов сейсмособытия, равных 125, 1000 и 3375 м³, составляют 8,24, 8,62 и 12,25 МПа, соответственно – при расположении сейсмособытия над выработкой и снижения упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 10 раз. При снижении упруго-прочностных свойств области сейсмособытия в 100 раз – те же параметры при соответствующих объемах очагов сейсмособытий составляют 10,64, 10,87 и 14,50 МПа.

Проведенный анализ результатов моделирования и расчета показывает, что максимальные отклонения главных напряжений (σ_3) в массиве горных пород зависят от объема очага сейсмособытия, его расположения относительно выработки (сбоку или сверху) и уровня снижения упруго-прочностных свойств массива при моделировании, степень этих зависимостей необходимо уточнить. В дальнейшем необходимо более детально и масштабно исследовать влияние различных параметров сейсмособытий (объем очага, локализация, энергия, частота) на НДС массива.

Отклонения главных напряжений (σ_3) в массиве горных пород наблюдаются на расстояниях 3 – 4 размера ребра куба, которым моделируется сейсмособытие. Это указывает на влияние сейсмических событий на НДС массива как вблизи горных выработок, так и в их отсутствии.

В дальнейшем необходимо более детально изучить характер и масштаб этих отклонений при различных параметрах сейсмособытий, таких как размер и форма очага сейсмособытия, энергия и частота сейсмических событий, расположение очага

относительно выработки, степень снижения упруго-прочностных свойств массива и др. Необходимо также анализировать все три главных напряжения (σ_1 , σ_2 и σ_3) совместно, т.к. только вместе они описывают НДС в элементарном объеме (условно в каждой точке массива). Такие исследования позволят установить количественные зависимости между параметрами сейсмособытий и изменениями НДС массива горных пород.

Заключение

В рамках разработки алгоритма оценки влияния сейсмособытий на НДС массива в процессе ведения горных работ на первом этапе было проведено моделирование влияния сейсмособытий на НДС массива горных пород при подземной разработке месторождений. В ходе настоящего исследования решались задачи моделирования участка массива и параметров очага сейсмособытия, а также оценка изменения НДС участка массива по результатам численного моделирования в зависимости от параметров сейсмособытий.

Анализируя данные, полученные в результате моделирования и оценки распределения главных напряжений в окрестности горной выработки, можно сделать вывод о том, что при рассмотренных параметрах модели массива горных пород, а также заданных параметрах сейсмособытий наблюдается заметное изменение НДС на расстояниях 25 – 40 м от контура выработки – максимум напряженности приходится на собственно сейсмоочаг, затем при дальнейшем удалении от выработки и очага напряжения гасятся еще через 10 – 15 м.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются

- обоснование связи между параметрами сейсмособытия и степенью снижения прочностных свойств в очаге сейсмособытия;
- оценка влияния дополнительных параметров сейсмособытий на изменение НДС массива горных пород (расстояние до горной выработки, минимальная энергия сейсмособытия, для которой необходим пересчет НДС массива и др.);
- исследование влияния серии сейсмособытий на кумулятивные изменения НДС и устойчивость выработок;
- разработка усовершенствованной модели, учитывающей анизотропные свойства массива и нелинейные эффекты перераспределения напряжений;
- интеграция численного моделирования с данными инструментального мониторинга для повышения точности прогнозов;
- разработка алгоритмов оперативной оценки влияния сейсмических событий в реальном времени с использованием методов машинного обучения;
- адаптация предложенной методики для различных горно-геологических условий и типов месторождений.

Дальнейшее развитие данного подхода позволит повысить эффективность управления геомеханическими рисками при подземной разработке месторождений.

Список литературы

1. Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Жукова С.А., 2021. Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 46–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.
2. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е., 2022. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь». *Уголь*, № 12, С. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
3. Mendecki A.J., 1997. *Seismic monitoring in mines*. London, Chapman and Hall. URL: https://www.researchgate.net/publication/346974170_Mendecki1997-Seismic-Monitoring-in-Mines-Book-Ch10 (дата обращения 20.06.2025)

4. Mendecki, A.J., 2023. Seismic ground motion alerts for mines. *J Seismol*, 27, 599-608 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10147-7>.
5. Ломакин В.С., Григорович С.В., Потехин Р.П., Халевин Н.И., 1989. О связи объема очаговой зоны разрушения с сейсмической энергией горного удара. *Геология и геофизика*, № 5, С. 129-132.
6. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В., 1983. О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага. *Доклады АН СССР*, Т. 271, № 3, С. 598-602.
7. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г., 2019. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*, № 9, С. 68-72. DOI 10.17580/gzh.2019.09.08.
8. Разумов Е.Е., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Простов С.М., 2021. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга. *Горный журнал*, № 1, С. 8-12.
9. Sadovskii M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P., 1985. On the seismic energy and volume of foci at crustal earthquakes and underground explosions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, Volume 283, Number 5, 1153-1156.
10. Карпенко В.В., Огородников Ю.Н., 2007. Параметры прямых продольных и поперечных сейсмических волн при горных ударах в скальных породах. *Записки Горного института*, №172, С. 14-17.
11. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И., 1986. К вопросу о классификации горных ударов. *ФТПРПИ*, № 5, С. 3-11.
12. Соннов М.А., Котиков Д.А., Куранов А.Д., 2018. Применение CAE Fidesys в решении геомеханических задач. *Горная промышленность*, № 5(141), С. 90. DOI 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92.
13. Гладков И.В., Якунчиков Е.Н., Румянцев А.Е., Соннов М.А., 2024. Моделирование влияния открытых горных работ на состояние нижележащего массива при планировании отработки подземным способом с применением программного комплекса CAE Fidesys. *Горная промышленность*, № 4, С. 165-172. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-165-172>
14. Батугин А.С., Мороз Н.Е., 2024. История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования. *Горная промышленность*, № 3S, С. 14-19. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>.

References

1. Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A., 2021. Seismichnost' kak otrazhenie izmenenii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyx porod v protsesse vedeniya gornyx rabot [Seismicity as a reflection of changes in the stress-strain state of a rock mass during mining operations]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 46-58. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_46.
2. Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E., 2022. Monitoring napryazhennogo sostoyaniya seismicheskimi i raschetnymi metodami na shakhtakh AO "Vorkutaugol" [Monitoring of the stress state by seismic and computational methods at the mines of JSC Vorkutaugo]. *Ugol'*, № 12, P. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
3. Mendecki A.J., 1997. Seismic monitoring in mines. London, Chapman and Hall. URL: https://www.researchgate.net/publication/346974170_Mendecki1997-Seismic-Monitoring-in-Mines-Book-Ch10 (data obrashcheniya 20.06.2025)
4. Mendecki, A.J., 2023. Seismic ground motion alerts for mines. *J Seismol*, 27, 599-608 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10147-7>.
5. Lomakin V.S., Grigorovich S.V., Potekhin R.P., Khalevin N.I., 1989. O svyazi ob"ema ochagovoi zony razrusheniya s seismicheskoi energiei gornogo udara [On the relationship between the volume of the zone of destruction and the seismic energy of the mountain impact].

onship of the volume of the focal zone of destruction with the seismic energy of a rock impact]. *Geologiya i geofizika*, № 5, S. 129-132.

6. Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Shteinberg V.V., 1983. O zavisimosti energii zemletryaseniya ot ob'ema seismicheskogo ochaga [On the dependence of earthquake energy on the volume of a seismic source]. *Doklady AN SSSR*, V. 271, № 3, P. 598-602.

7. Mulev S.N., Pital' M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G., 2019. Sovremennyye tekhnologii seismicheskogo monitoringa ugol'nykh shakht i rudnikov [Modern technologies of seismic monitoring of coal mines and mines]. *Gornyi zhurnal*, № 9, P. 68-72. DOI 10.17580/gzh.2019.09.08.

8. Razumov E.E., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Prostov S.M., 2021. Osnovnye printsipy postroeniya sistem seismicheskogo monitoring [Basic principles of building seismic monitoring system]. *Gornyi zhurnal*, № 1, P. 8-12.

9. Sadovskii M.A., Kedrov O.K., Pasechnik I.P., 1985. On the seismic energy and volume of foci at crustal earthquakes and underground explosions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, Volume 283, Number 5, 1153-1156.

10. Karpenko V.V., Ogorodnikov Yu.N., 2007. Parametry pryamykh prodol'nykh i poperechnykh seismicheskikh voln pri gornykh udarakh v skal'nykh porodakh [Parameters of direct longitudinal and transverse seismic waves during rock impacts in rocks]. *Zapiski Gornogo instituta*, №172, P. 14-17.

11. Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Kulakov G.I., 1986. K voprosu o klassifikatsii gornykh udarov [On the classification of rock impacts]. *FTPRPI*, № 5, P. 3-11.

12. Sonnov M.A., Kotikov D.A., Kuranov A.D., 2018. Primenenie CAE Fidesys v reshenii geomekhanicheskikh zadach [Application of CAE Fidesys in solving geomechanical problems]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5(141), P. 90. DOI 10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92.

13. Gladkov I.V., Yakunchikov E.N., Rumyantsev A.E., Sonnov M.A., 2024. Modelirovanie vliyaniya otkrytykh gornykh rabot na sostoyanie nizhelezhachego massiva pri planirovanii otrabotki podzemnym sposobom s primeneniem programmnoy kompleksa CAE Fidesys [Modeling the impact of open-pit mining on the condition of the underlying massif when planning underground mining using the CAE Fidesys software package]. *Gornaya promyshlennost'*, № 4, P. 165–172. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-165-172>

14. Batugin A.S., Moroz N.E., 2024. Istoriya razvitiya i perspektivy dal'neishego primeneniya metoda geodinamicheskogo raionirovaniya [History of development and prospects of further application of the geodynamic zoning method]. *Gornaya promyshlennost'*, № 3S, P. 14–19. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>.

УДК 622.831.325.3

Сердюк Иннокентий Михайлович,
инженер-исследователь,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54
e-mail: ken04588@gmail.com

Евстигнеев Дмитрий Сергеевич,
младший научный сотрудник,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН
e-mail: rdx@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ И ИЗВИЛИСТОСТИ ТРЕЩИНЫ В УГОЛЬНОМ КЕРНЕ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация:

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением фильтрационно-емкостных свойств трещин угольного керна на основе анализа изображений анилифов, снятых сканирующим электронным микроскопом. С привлечением численного моделирования уравнений газодинамики исследуются особенности установившегося ламинарного режима течения газа в единичной трещине. Показано, что на уменьшение скорости потока газа, проходящего по трещине в угле, существенно влияют ее геометрические особенности. Расход газа в первую очередь зависит от ширины раскрытия трещины и ее извилистости. Остальные факторы, такие как шероховатость, ее тип и клиновидность, меньше влияют на величину потерь напора газа по длине трещины. Простая модификация уравнения Буссинеска, учитывающая вклад каждого фактора, обусловленного геометрией трещины, позволяет описать процесс течения газа в реальной трещине. На примере исследования анилифов, подготовленных из угольного керна, выбуренного из крупного куска угля Пермьяковского разреза Караканского угольного месторождения методом электронной микроскопии и последующей цифровой обработкой полученных изображений с привлечением численных методов моделирования течения газа, показано, что наибольшее сопротивление движению газа в трещине оказывает ее извилистость. Разработана методика определения ширины раскрытия, извилистости и шероховатости берегов трещины, которая позволяет как определить перечисленные геометрические параметры трещины, так и рассчитать газопроницаемость по ней. При необходимости возможно применить методику для предсказания газопроницаемости в угольном кернах, но для этого необходимо произвести расчеты смыкания берегов трещины, обусловленные наложением горного давления на границу поверхности керна.

Ключевые слова: уголь, трещина, анилиф, потери потока при фильтрации, ширина раскрытия трещины, шероховатость, извилистость, газопроницаемость.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.080

Serdyuk Innokenty M.,
Research Engineer,
N.A. Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of RAS,
630091 Novosibirsk, 54 Krasnyi Prospekt.
e-mail: ken04588@gmail.com

Evstigneev Dmitry S.,
Junior Researcher,
N.A. Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of RAS,
e-mail: rdx@gmail.com

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR RESEARCHING THE OPENING WIDTH AND TORTULUSITY OF A CRACK IN A COAL CORE ACCORDING TO ELECTRON MICROSCOPY DATA

Abstract:

The article discusses issues related to the determination of filtration-capacitance properties of cracks in coal core based on the analysis of images of polished sections taken with a scanning electron microscope. Using numerical modeling of gas dynamics equations, the features of the steady-state laminar gas flow regime in a single crack are studied. It has been shown that the decrease in the speed of gas flow passing through a crack in coal is significantly influenced by its geometric features. Gas consumption primarily depends on the opening width of the crack and its tortuosity. Other factors, such as roughness, its type and wedge shape, make a smaller contribution to the amount of gas pressure loss along the length of the crack. A simple modification of the Boussinesq equation, taking into account the contribution of each factor determined by the geometry of the crack, allows us to describe the process of gas flow in a real crack. Using the example of studying polished sections prepared from a coal core drilled from a large piece of coal from the Permyakovsky section of the Karakan coal deposit using electron microscopy and subsequent digital processing of the resulting images using numerical methods for modeling gas flow, it is shown that the greatest resistance to gas movement in a crack is provided by its tortuosity. A method has been developed for determining the opening width, tortuosity and roughness of the crack faces, which allows both to determine the listed geometric parameters of the crack and to calculate the gas permeability along it. If necessary, it is possible to apply the technique to predict gas permeability in a coal core, but for this it is necessary to calculate the closure of the crack faces due to the imposition of rock pressure on the boundary of the core surface.

Key words: coal, crack, polished section, flow loss during filtration, crack opening width, roughness, tortuosity, gas permeability.

Введение

Для угольных месторождений характерен особый вид очень мелкой трещиноватости – кливаж [1–3]. Его проявление связано с процессом напластования угля вдоль параллельных плоскостей. Порода приобретает свойства мелкой делимости и склонна к разрушению, сыплется. Обычно наиболее выражен кливаж осевой плоскости, ориентированный параллельно осевым плоскостям складок [2]. Процессы фильтрации метана по сложившейся системе трещин тесным образом связаны с их пространственной ориентировкой, густотой, главным направлением развития трещиноватости и с влиянием различных элементов геометрии трещины [2, 4], и главным фактором здесь является ширина раскрытия трещины. Проницаемость трещиноватой среды пропорциональна кубу средней ширины раскрытия трещин [4]. Также немаловажное значение имеют потери напора газа в самой трещине, обусловленные шероховатостью поверхности берегов трещины, ее типом, клиновидностью и извилистостью [5]. Воспользуемся современными техническими возможностями сканирующего электронного микроскопа и методами обработки цифровых изображений для исследования фильтрационно-емкостных свойств трещин угольного керна, выбуренного из крупных кусков угля, отобранного из Пермьковского разреза Караканского угольного месторождения. Для достижения поставленной цели необходимо разработать методику исследования ширины раскрытия и извилистости трещины.

Теоретическая модель фильтрации газа в трещиноватых средах

Рассмотрим течение газа в канале прямоугольной формы длиной L , шириной δ и высотой h . Расход газа Q , проходящего через площадь поперечного сечения $S = \delta \cdot h$, будет описываться уравнением Буссинеска [4, 6]:

$$Q = -\frac{\delta^3 h}{12\mu} \nabla p, \quad (1)$$

в котором μ – динамическая вязкость газа; p – давление.

Выразим линейную скорость истечения газа u из (1):

$$u = \frac{Q}{\delta \cdot h} = -\frac{\delta^2}{12\mu} \nabla p. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для расчета течения газа в каналах и трещинах с гладкими прямолинейными стенками. В реальных трещиноватых породах скорость фильтрации будет меньше, ввиду того что в (2) не учитываются потери напора при ламинарном движении, вызванные влиянием различных элементов геометрии трещины на сопротивление потоку газа. Частично решает проблему введение коэффициента сопротивления движению, учитывающего влияние шероховатости трещины $\xi_{\text{ш}}$ [7–9]:

$$u = \frac{\delta^2}{12\mu\xi_{\text{ш}}} \nabla p, \quad (3)$$

который можно определить по эмпирической формуле [7, 9]:

$$\xi_{\text{ш}} = 1 + 8,8 \left[\frac{\Delta}{D_{\Gamma}} \right]^{1,5}, \quad (4)$$

где Δ – шероховатость поверхности трещины; Δ / D_{Γ} – безразмерный параметр, выражающий относительную шероховатость трещины (D_{Γ} – гидравлический диаметр).

Перечислим все факторы потерь потока, влияющие на сопротивление движению газа в трещине по всей ее длине, за исключением местных потерь [5]:

$$f = f_{\text{гл}} \xi_{\text{ш}} \xi_{\text{т}} \xi_{\text{к}} \xi_{\text{л}},$$

где $f_{\text{гл}} = 6/\text{Re}$ – сопротивление движению в основной простейшей модели идеальной трещиноватой породы – гладкой щели с параллельными стенками (Re – число Рейнольдса),

а все прочие сомножители учитывают шероховатость, тип шероховатости, клиновидность и удлинение пути вследствие извилистости трещин.

Коэффициент извилистости ξ_ℓ , повышающий сопротивление движению f , определяется по формуле [5]:

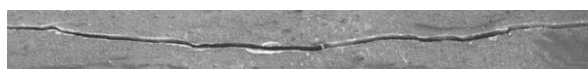
$$\xi_\ell = \frac{\ell}{L}, \quad (5)$$

где ℓ – протяженность реального пути фильтрации, L – кратчайшее расстояние между двумя точками фильтрационного поля.

Описание методики исследования ширины раскрытия и извилистости трещины

Ширину раскрытия трещины δ , а также ее шероховатость Δ , коэффициент извилистости ξ_ℓ определим, обрабатывая фотографии аншлифов, снятые сканирующим электронным микроскопом Hitachi S-3400N с увеличением в 8 раз.

Из угольного керна цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, извлеченного из Пермьяковского разреза Караканского угольного месторождения (Кузнецкий бассейн), подготовлены аншлифы и исследованы под микроскопом. Уголь марки «D» обладает плотной структурой с мелкой трещиноватостью. На фотографиях аншлифов четко прослеживаются как большие, видимые даже человеческим глазом магистральные трещины, так и множество мелких, различимых только под микроскопом. Фильтрация газа в таком угле осуществляется по существующей системе трещин. На рис. 1 приведена фотография поверхности аншлифа угольного керна с хорошо прослеживающейся трещиной, а также результат очистки фона, содержащего угольное вещество, поры и включения минералов.



Фотография трещины



Убран фон, выделена трещина

Рис. 1. Фотография трещины на поверхности аншлифа угля

Коэффициент извилистости ξ_ℓ и ширину раскрытия вдоль трещины определим численно, решив газодинамическую задачу течения азота по ней. Режим течения в трещине – ламинарный, установившийся, газ считаем слабо сжимаемым, тогда определяющие уравнения составляют уравнение сохранения импульса и неразрывности:

$$\begin{aligned} p(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot [-pI + K]; \\ p\nabla \cdot u &= 0; \\ K &= \mu(\nabla u + (\nabla u)^T), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}$ – оператор набла в прямоугольной системе координат;

$\vec{i}$, $\vec{j}$ – единичные векторы по осям x и y ; I – единичная матрица;

K – тензор вязких напряжений.

Полагая, что процесс течения газа в трещине изотермический, дополним систему уравнений (6) уравнением состояния для квазисовершенного газа:

$$\frac{p}{\rho} = Z \cdot R \cdot T, \quad (7)$$

где Z – коэффициент сжимаемости газа; $R = R_0 / M$ – газовая постоянная;

R_0 – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса газа; T – температура газа.

На левой границе трещины поставим граничное условие в виде развитого потока со скоростью 0,01 м/с, а на правой – абсолютное давление, равное атмосферному 1 атм. Начальное давление газа в трещине примем 1 атм, скорость потока 0 м/с.

После численного решения поставленной задачи течения газа в трещине получим поле скоростей, из которого выделим максимальную по абсолютной величине скорость в сечении потока $u_{\max}$. Для скорости $u_{\max}$, имея ее пространственные координаты точек (x_i, y_i) , рассчитаем путь, пройденный частичкой по потоку вдоль трещины ℓ . Расстояние ℓ_i между двумя точками координат (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) рассчитаем по теореме Пифагора, $\ell_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$ тогда общая длина ломаной $\ell = \sum_{i=1}^n \ell_i$,

где n – число точек разбиения. Линейное расстояние между левым и правым концом трещины $L = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2}$. По формуле (5) определим коэффициент извилистости ξ_ℓ .

Ширину раскрытия вдоль трещины с привязкой к координатам узлов звеньев ломаной δ_i определим как расстояние между берегами трещины по прямой, уравнение которой задается точкой координаты узла ломаной (x_i, y_i) и вектором нормали к пути ℓ . Построим кусочно-квадратичный полином для интерполяции ℓ на отрезке $[x_{i-1}, x_{i+1}]$. Для каждой трех узловых точек звеньев ломаной (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) запишем уравнение параболы:

$$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2. \quad (8)$$

Подставив в (8) координаты точек (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) и разрешив полученную систему уравнений относительно коэффициентов a_0, a_1, a_2 , получим:

$$a_0 = y_{i-1} - a_1 \cdot x_{i-1} - a_2 \cdot x_{i-1}^2;$$

$$a_1 = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} - a_2 \cdot (x_i + x_{i-1}); \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{(x_{i+1} - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i)} - \frac{y_i - y_{i-1}}{(x_i - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}.$$

Вычислим производную от уравнения параболы (8):

$$y'(x) = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x. \quad (10)$$

Тогда с учетом (10) уравнение нормали к линии ℓ в точке (x_i, y_i) будет

$$y_{\text{норм}}(x) = -\frac{1}{y'(x_i)}(x - x_i) + y_i. \quad (11)$$

После нахождения δ_i по всем узлам ломаной рассчитаем среднеарифметическое значение $\langle \delta \rangle$, которое и примем за среднюю ширину раскрытия трещины δ .

Под шероховатостью поверхности трещины Δ будем понимать среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины ℓ . В терминах ГОСТа [10] Δ совпадает с Ra :

$$\Delta = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell (\delta(x) - \langle \delta \rangle) dx, \quad (12)$$

где $\delta(x)$ – интерполяционная кривая, построенная по точкам δ_i по длине пути ℓ .

Рассчитав по формуле (12) Δ , из уравнения (4) найдем коэффициент шероховатости трещины $\xi_{ш}$. При этом положим гидравлический диаметр D_H равным средней ширине раскрытия трещины δ .

Результаты исследования

Численное моделирование ламинарного течения газа по трещине в статической постановке по уравнениям (6), (7) выполним методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics. В программе есть возможность импорта растрового изображения с последующей интерполяцией его перевода в векторные кривые с помощью модуля Image to Curve. Рассчитав поле скоростей течения газа в трещине, выделим из него максимальную по абсолютной величине скорость в сечении потока $u_{\max}$, показанную на рис. 2 отдельной красной линией.

Длина пути выделенной линии ℓ равна 27,236 мм, а линейное расстояние между левым и правым концом трещины $L=26,943$ мм. Следовательно, коэффициент извилистости трещины, рассчитанный по (5), составит $\xi_\ell=1,011$.

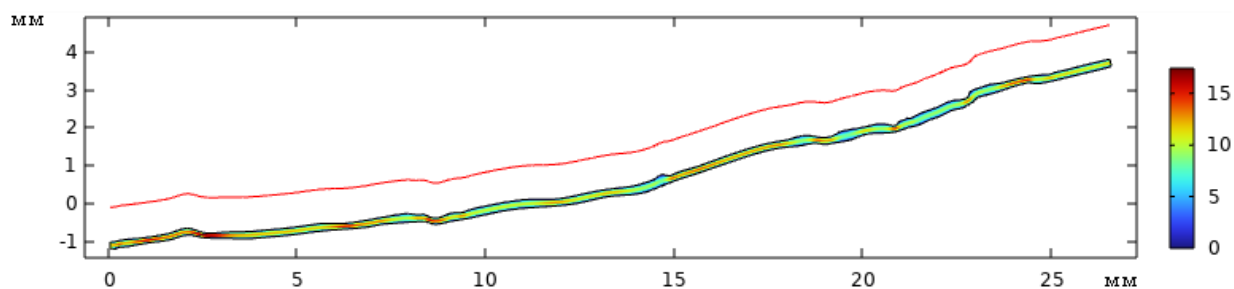


Рис. 2. Поле скорости течения газа в трещине, м/с

Разобьем линию $u_{\max}$ вдоль трещины на равные интервалы и в серединах каждого из них построим уравнение нормали (10). Зададим на уравнении нормали две точки, расположенные симметрично относительно рассматриваемой линии, расстояние между которыми положим равным 1 мм, как показано на рис. 3.

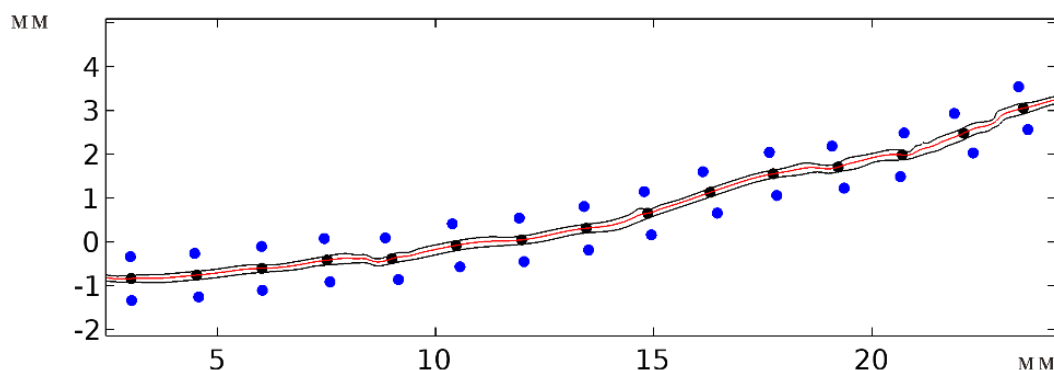
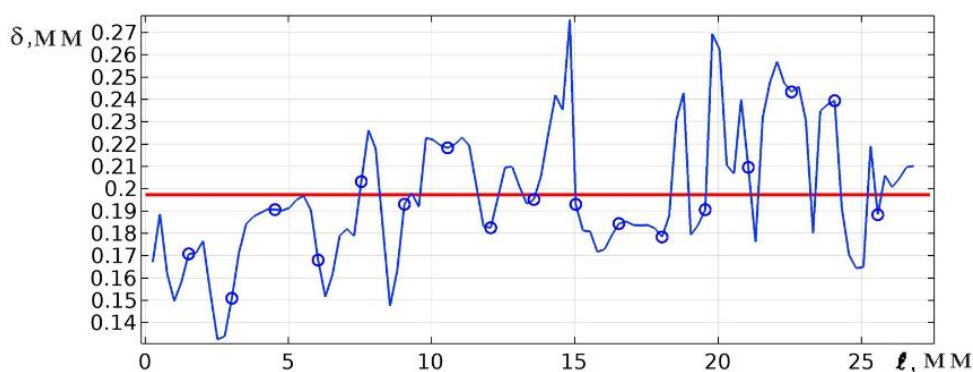


Рис. 3. Разбиение трещины на интервалы вдоль линии ℓ

Измерим ширину раскрытия трещины на каждом интервале вдоль линии модуля максимальной скорости течения газа и рассчитаем ее среднеарифметическое значение $\langle \delta \rangle = 0,197$ мм. Построим график изменения ширины раскрытия трещины δ_i по ее длине ℓ (рис. 4).


 Рис. 4. Изменение ширины раскрытия трещины вдоль линии ℓ

Расчетное значение шероховатости поверхности трещины Δ , вычисленное по формуле (11), составило 19 нм. Коэффициент шероховатости по (4) $\xi_{ш} = 1,00001$.

Выводы

Потери скорости потока газа в трещине обусловлены влиянием различных элементов геометрии трещины: шириной раскрытия, шероховатостью и ее типом, клиновидностью и извилистостью.

Обработка изображений поверхности аншлифов угольного керна, полученного со сканирующего электронного микроскопа с применением предложенной методики, позволяет определить основные геометрические параметры, влияющие на сопротивление потоку газа в трещине. В частности, исследования, проведенные на примере угольного керна, позволили определить среднюю ширину раскрытия трещины – 0,197 мм, коэффициенты шероховатости – 1,00001 и извилистости – 1,011.

Газопроницаемость единичной трещины пропорциональна квадрату раскрытия трещины. Проведенные исследования по определению средней ширины раскрытия трещины позволяют получить максимальную оценку газопроницаемости угольного керна без учета горного давления. В условиях лабораторного эксперимента, при приложении обжимающего давления на поверхность угольного керна трещины будут сжиматься и, следовательно, газопроницаемость в них будет падать. Однако методика будет работать и в этом случае. Для этого необходимо численно промоделировать смещение берегов трещины, вызванное приложенной нагрузкой, и произвести расчеты по предложенной методике.

Список литературы

1. Лыков И.Ф., 1976. *Кливаж и его влияние на характер обрушения пород*. Москва: Недра, 227 с.
2. Епифанцев О.Г., Плетенчук Н.С., 2008. *Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения*. Метод. реком. Новокузнецк: СибГИУ, 41 с.
3. Чернышов С. Н., 1983. *Трещины горных пород*. Учебник. Москва: Наука, 240 с.
4. Пономарева И.Н., Мордвинов В.А., 2009. *Подземная гидромеханика*. Учебное пособие. Пермь, Перм. гос. техн. ун-т, 103 с.
5. Ломизе Г.М., 1951. *Фильтрация в трещиноватых породах*. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 127 с.
6. Тиаб Дж., Доналдсон Э.Ч., 2009. *Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов*. Справочник. Москва: ООО «Премиум Инжиниринг», 868 с.

7. Zhang Sh., Liu X., Wang K., 2024. The friction factor of the fracture-matrix system considering the effects of free flow, seepage flow, and roughness. *Journal of Hydrology*, Vol. 628, P. 130602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130602
8. Louis C.A., 1969. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. London: Imperial College of Science and Technology, 90 P.
9. Kim Y.I., Amadei B., Pan E., 1999. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, No 7, P. 949–970. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00046-7.
10. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. ГОСТ 2789-73 - Введ. 1973-04-23. Москва: Стандартинформ, 2018, 6 с.

References

1. Lykov I.F., 1976. Klivazh i ego vliyanie na kharakter obrusheniya porod [Cleavage and its influence on the nature of rock collapse]. Moscow: Nedra, 227 p.
2. Epifantsev O.G., Pletenchuk N.S., 2008. Treshchinovatost' gornyx porod [Rock fracturing. Fundamentals of theory and study methods]. *Osnovy teorii i metody izucheniya. Metod. rekom.* Novokuznetsk: SibGIU, 41 p.
3. Chernyshov S. N., 1983. Treshchiny gornyx porod. Uchebnik [Rock cracks]. Moscow: Nauka, 240 p.
4. Ponomareva I.N., Mordvinov V.A., 2009. Podzemnaya gidromekhanika [Underground hydromechanics]. Uchebnoe posobie. Perm', Perm. gos. tekhn. un-t, 103 p.
5. Lomize G.M., 1951. Fil'tratsiya v treshchinovatykh porodakh [Filtration in fractured rocks]. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 127 p.
6. Tiab Dzh., Donaldson E.Ch., 2009. Petrofizika: teoriya i praktika izucheniya kollektorskiykh svoystv gornyx porod i dvizheniya plastovykh flyuidov [Petrophysics: theory and practice of studying reservoir properties of rocks and movement of formation fluids]. Spravochnik. Moscow: OOO "Premium Inzhiniring", 868 p.
7. Zhang Sh., Liu X., Wang K., 2024. The friction factor of the fracture-matrix system considering the effects of free flow, seepage flow, and roughness. *Journal of Hydrology*, Vol. 628, P. 130602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130602
8. Louis C.A., 1969. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. London: Imperial College of Science and Technology, 90 p.
9. Kim Y.I., Amadei B., Pan E., 1999. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, No 7, P. 949–970. DOI: 10.1016/S0148-9062(99)00046-7.
10. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki [Surface roughness. Parameters and characteristics]. GOST 2789-73 - Vved. 1973-04-23. Moscow: Standartinform, 2018, 6 p.

УДК 622.831:550.83

Шевченко Максим Дмитриевич

младший научный сотрудник,
отдел геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА****Аннотация:*

В данной работе рассматриваются современные геофизические методы, используемые для анализа геомеханического состояния горных массивов. Основное внимание уделяется методам спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования, которые позволяют получать детальные сведения о внутренней структуре горных пород на значительных глубинах и обширных территориях без разрушения целостности массива.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность этих методов как при совместном, так и при раздельном использовании. Они обеспечивают подробное исследование структуры горных пород, идентификацию зон трещиноватости, тектонических разломов и карстовых пустот, что существенно повышает безопасность и продуктивность горных работ и строительство зданий и сооружений.

Несмотря на специфику каждой из указанных методик и присущие им ограничения, их совместное использование способно нивелировать отдельные недостатки и обеспечить получение более точной информации о состоянии горного массива. Так, метод спектрального сейсмопрофилирования является высокоэффективной технологией для глубинных изысканий, тогда как метод георадарного зондирования предпочтительно использовать для исследования малых глубин.

Практическая значимость этих подходов выражается в оперативном обнаружении потенциально опасных участков, разработке предупреждающих мероприятий против возникновения аварийных ситуаций и повышении устойчивости горных выработок. Применение данных технологий позволяет оптимизировать процессы извлечения полезных ископаемых и строительства объектов недропользования, минимизируя риски природно-техногенных катастроф.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.087

Shevchenko Maksim D.

Junior Researcher, Department of Geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Yekaterinburg,
Mamina-Sibiryak st., 58
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**MODERN GEOPHYSICAL METHODS
IN STUDYING THE GEOMECHANICAL
STATE OF A ROCK MASS***Abstract:*

This paper discusses modern geophysical methods used to analyze the geomechanical state of rock massifs. The main attention is paid to the methods of spectral seismic profiling and ground penetrating radar sounding, which allows obtaining detailed information about the internal structure of rocks at significant depths and over vast territories without destroying the integrity of the massif.

Experimental studies have shown the high efficiency of these methods both when used together and separately. They provide a detailed study of the structure of rocks, identification of fracturing zones, tectonic faults and karst voids, which significantly increases the safety and productivity of mining operations, and the construction of buildings and structures.

Despite the specifics of each of these methods and their inherent limitations, their combined use can level out individual shortcomings and provide more accurate information about the state of the rock mass. Thus, the spectral seismic profiling method is a highly effective technology for deep surveys, while the ground penetrating radar sounding method is preferably used to study shallow depths.

The practical significance of these approaches is expressed in the prompt detection of potentially hazardous areas, development of preventive measures against emergency situations and increasing the stability of mine workings. The use of these technologies allows optimizing the processes of mineral extraction and construction of subsoil use facilities, minimizing the risks of natural and man-made disasters.

The obtained results indicate that modern geophysical technologies are key tools for studying the geomechanical state of rock massifs. Further evolution and integration of these methods will open new horizons for in-depth knowledge and safe exploitation of natural resources.

* Исследование выполнено в рамках Госзадания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что современные геофизические технологии представляют собой ключевые инструменты для исследования геомеханического состояния горных массивов. Дальнейшая эволюция и интеграция этих методов откроют новые горизонты для углубленного познания и безопасной эксплуатации природных ресурсов.

Ключевые слова: геофизические методы, геомеханика, подземные горные выработки, сейсмические методы, аварийные ситуации, структурные особенности массива, геомеханическое состояние.

Key words: geophysical methods, geomechanics, underground mine workings, seismic methods, emergency situations, structural features of the massif, geomechanical state.

Введение

В условиях интенсивного освоения природных ресурсов и развития горнодобывающей промышленности вопросы обеспечения безопасности и устойчивости горных выработок приобретают все большую актуальность [1, 2]. Одним из ключевых факторов, определяющих стабильность горных массивов, является их геомеханическое состояние, включающее в себя напряженное и деформированное состояние, трещиноватость, пористость и другие параметры [3, 4]. Традиционные методы оценки геомеханического состояния, такие как бурение скважин и лабораторные испытания, характеризуются высокими затратами, трудоемкостью и ограниченными возможностями получения информации [5 – 7].

Современные геофизические методы предлагают альтернативный подход к изучению геомеханического состояния горных массивов. Эти методы позволяют получать данные о внутреннем строении и свойствах горных пород на больших глубинах и площадях, не нарушая целостность массива. Каждый из этих методов имеет свои особенности и области применения, что делает их ценными инструментами для комплексного анализа геомеханического состояния.

Цель данной научно-исследовательской работы – рассмотреть современные геофизические методы, используемые отделом геомеханики Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН) для изучения геомеханического состояния горных массивов, и показать их возможности и ограничения. В статье будут представлены основные принципы каждого из методов, а также примеры их применения в реальных условиях.

Методы исследования

В статье представлено использование нескольких геофизических методов для прогноза геомеханического состояния горного массива, таких как спектральное сейсмопрофилирование и георадарное зондирование. Многолетний опыт использования данных методов сотрудниками отдела геомеханики ИГД УрО РАН показал, что их применение позволяет существенно повысить точность прогнозов геомеханического состояния горных массивов, обеспечивая своевременное выявление потенциально опасных зон и разработку эффективных мер по предотвращению аварийных ситуаций не только в наземных, но и в подземных условиях [8 – 10]. Рассмотрим принцип действия каждого метода и их положительные свойства.

Метод спектрального сейсмопрофилирования (метод ССП)

Спектральное сейсмопрофилирование – это метод, который позволяет исследовать внутреннее строение горных пород с помощью анализа распространения сейсмических волн.

Метод основан на зависимости спектрального состава колебаний, возникающих при ударе на поверхность, и структурой породного массива. Физические эффекты по-

дробно описаны в источнике [11]. Собственные упругие колебания массива возникают из-за наличия геологических структур, действующих как колебательные системы. Сигналы содержат гармонические затухающие колебания, связанные с размерами объектов:

$$h_i = \frac{V_{сдв}}{f_{oi}}, \quad (1)$$

где $V_{сдв} \approx 2500$ м/с – скорость поперечных колебаний.

Любой сигнал во времени преобразуется в спектр с помощью Фурье-преобразования. Спектральный вид сигнала (рис. 1b) дает лучшее разрешение по частоте. Видны частоты: 10, 17,8, 26, 31, 50 Гц. Используя формулу (1), получаем глубину (h) и строим разрез. С увеличением глубины разрешающая способность снижается.

Значения плотности спектра $A(f)$ соответствуют добротности Q и находятся в диапазоне от 1,2 до 12,5.

Спектральное изображение поворачивается на 90° для построения разреза (рис. 1c). На глубинах 140 и 250 м границы четче, а ближе к поверхности наблюдается снижение четкости. На глубине 50 м – слоистая структура или повышенная нарушенность.

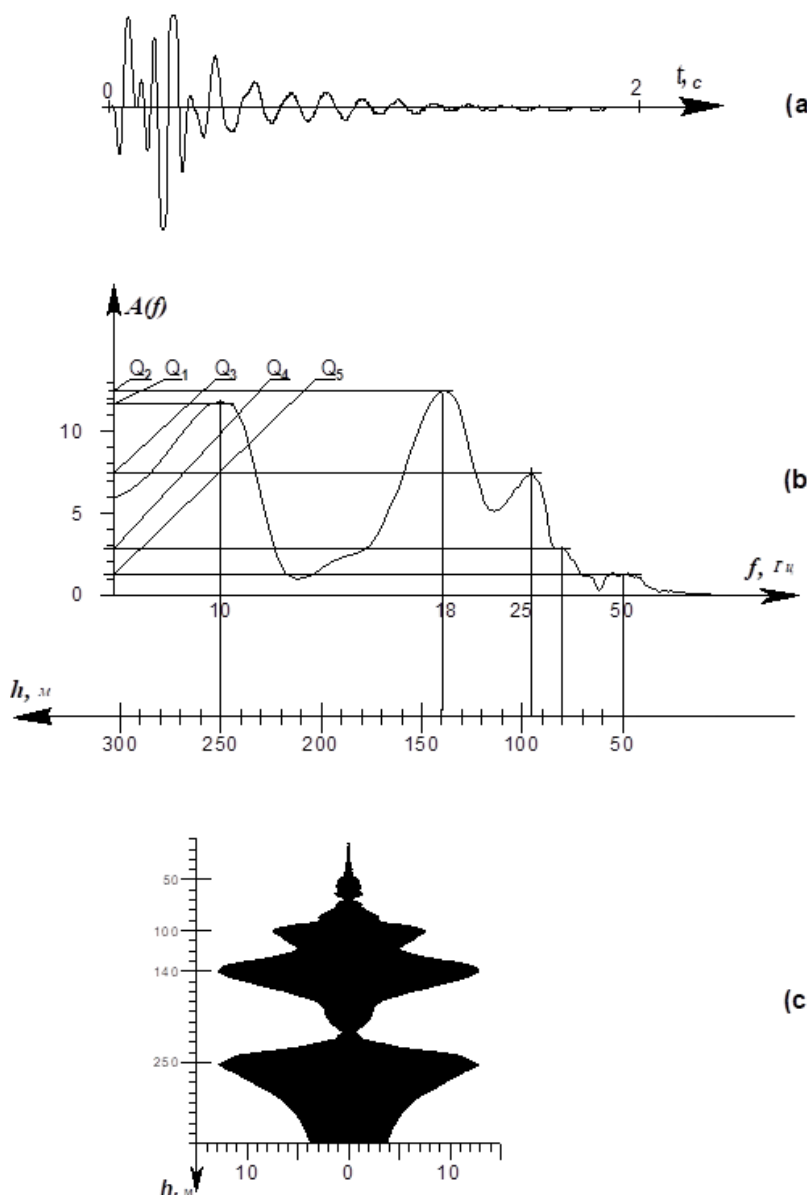


Рис. 1. Схема перехода сейсмосигнала к разрезу массива

Метод георадарного зондирования (ГРЗ)

Радиолокационный метод основан на отражении электромагнитных волн от границ сред с разными электрическими свойствами. Передающая антенна отправляет радиоволны, которые частично отражаются от слоев и возвращаются на поверхность, а другая часть проникает глубже. Время прохождения импульсов определяет глубину залегания слоев. Основные параметры – удельное затухание и скорость распространения волн – определяют глубину зондирования и необходимы для расчета расстояний до границ.

Почвы рассматриваются как диэлектрики с конечной проводимостью, их диэлектрическая проницаемость зависит от частоты и влажности. Глубина проникновения волн зависит от электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости грунта. Георадары используют широкополосные сигналы для зондирования подповерхностных слоев. Задача реконструкции заключается в определении распределения электродинамических характеристик среды по глубине на основе наблюдаемых сигналов.

Для решения обратной задачи применяется либо сравнение временных сигналов, либо использование спектров сигналов. Первый подход сложен из-за множества локальных минимумов, второй более перспективен, но требует качественных данных. Преобразование Лапласа позволяет упростить расчеты и повысить эффективность численных методов.

Результаты исследования

В данной главе представлены результаты проведенного исследования, которые являются основой для анализа и интерпретации полученных данных.

Использование метода спектрального сейсмопрофилирования в подземных условиях

На основании полученных исследовательских данных была построена схема подземных горных выработок, интегрированная с результатами спектрального сейсмопрофилирования (рис. 2).

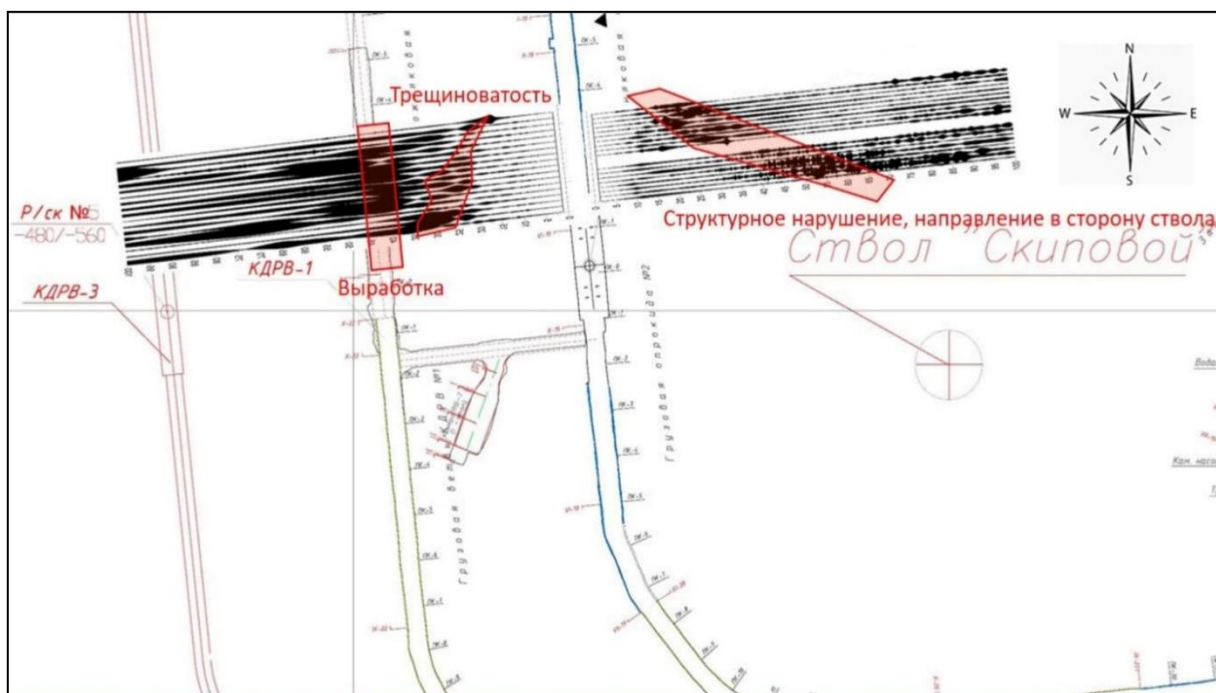


Рис. 2. Схема подземных горных выработок, совмещенная с результатами ССП

В ходе исследовательской работы на данном участке были проведены геофизические исследования по двум профилям. Первый профиль, расположенный в западной части участка, имел протяженность 50 м и глубину исследований 100 м. Второй профиль, находящийся в южной части участка, характеризовался длиной 60 м и аналогичной глубиной исследований – 100 м. Оба профиля располагались параллельно стенкам горной выработки.

В результате анализа первого профиля было установлено наличие зоны трещиноватости горных пород на глубинах от 25 до 35 м, постепенно сужающейся в северном направлении до 1 – 2 м. Дополнительно посредством данного профиля удалось зафиксировать местоположение границ смежной выработки, находящейся на удалении 40 м от экспериментальной области.

Анализ второго профиля выявил присутствие тектонического нарушения на интервале глубин от 50 до 65 м, распространяющегося по всей длине изучаемого участка. Данное разломное образование характеризуется преимущественной ориентацией с запада на восток и демонстрирует относительно стабильную мощность порядка 15 м.

Совместное использование методов спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования

В ходе проведения исследований был построен совмещенный разрез по данным метода ССП и метода ГРЗ (рис. 3).

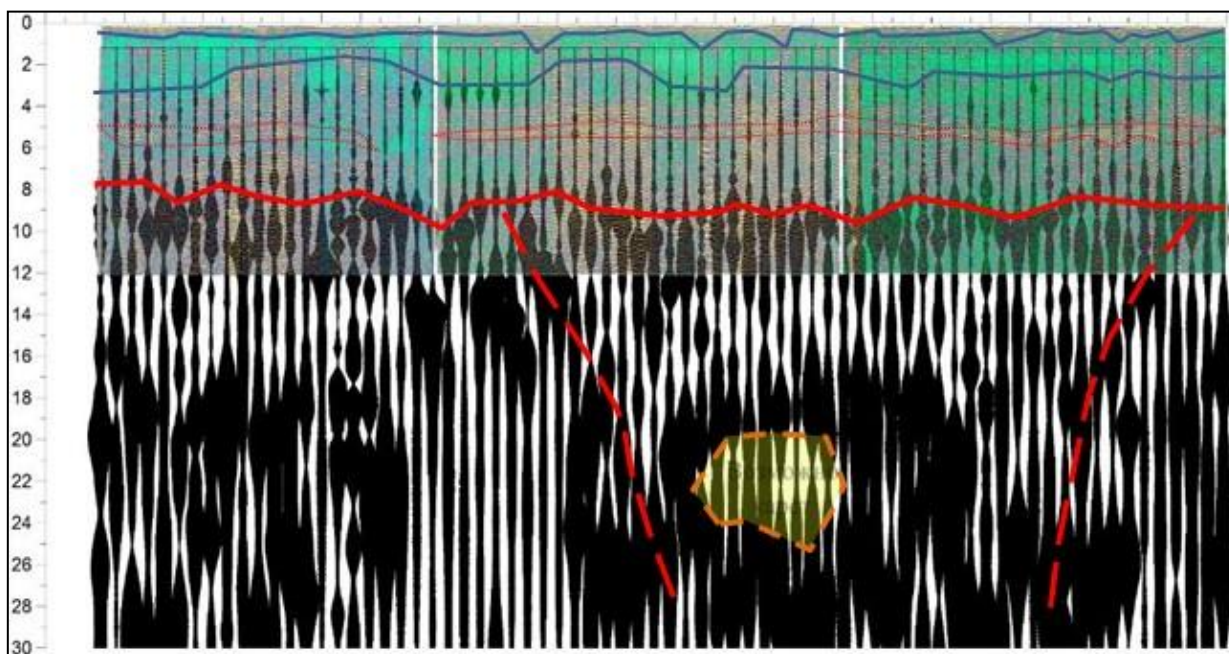


Рис. 3. Совмещенный разрез по данным метода ССП и метода ГРЗ

На исследуемом участке отмечается присутствие слоя техногенных отложений, локализованного на глубинах от 0 до 1–1,5 м. Ниже данного слоя залегают суглинистые породы, простирающиеся до отметок 8–10 м. Граница коренных скальных пород проходит на глубине 10 м и обозначается сплошной красной линией.

Одним из характерных геологических элементов данной территории являются два структурных нарушения, выявленных на глубинах свыше 10 м (субгоризонтальные красные линии). Дополнительно установлено наличие природных пустот в горных породах, отмеченных прерывистыми желтыми линиями, образующими округлый контур.

Обсуждение результатов

В рамках проведенного исследования было доказано, что методы спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования обладают высокой эффективно-

стью как при комплексном, так и при автономном применении для анализа геомеханического состояния горных массивов. Данные методики позволяют детально исследовать внутреннюю структуру массива, выявляя распределение зон трещиноватости, местоположение тектонических разломов и наличие карстовых пустот.

Метод спектрального сейсмопрофилирования продемонстрировал особую эффективность в обнаружении глубоких аномалий и тектонических разрывов, что способствует прогнозированию потенциальных зон нестабильности. В свою очередь, георадарное зондирование обеспечивает высокое разрешение на небольших глубинах, способствуя точной локализации участков с повышенной трещиноватостью и поверхностными гетерогенностями.

Однако каждый из указанных методов имеет свои ограничения. Применение георадарного зондирования затруднено на значительных глубинах и в условиях почвы с высокой проводимостью, где повышенная влажность или солевой состав могут значительно усилить затухание радиосигнала. Спектральное сейсмопрофилирование, наоборот, менее результативно на малых глубинах из-за специфики распространения сейсмических волн. Однако комплексное применение этих методик компенсирует индивидуальные недостатки каждого из них, предоставляя всесторонний анализ геомеханического состояния массива.

Практическое значение применения данных методов заключается в повышении уровня безопасности и повышении производительности горных разработок. Своевременная идентификация зон трещиноватости и тектонических нарушений позволяет оптимизировать планирование маршрутов бурения и принятия профилактических мер по укреплению стен шахт и туннелей, оценку развития оползневых процессов и безопасное размещение объектов недропользования. Следовательно, использование спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования становится ключевым элементом устойчивого и безопасного развития горной промышленности.

Заключение

В ходе проведенных исследований было доказано, что методы спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования обладают высокой эффективностью как при совместном, так и при раздельном использовании для оценки геомеханического состояния горных массивов. Эти методы позволяют получить подробную информацию о внутренней структуре массива, включая распределение зон трещиноватости, тектонических разломов и карстовых пустот, что способствует повышению безопасности и эффективности горных работ.

Однако оба метода имеют свои ограничения. Георадарное зондирование ограничено в применении на больших глубинах и в условиях высокопроводящих почв, тогда как спектральное сейсмопрофилирование менее эффективно на малых глубинах. Совместное использование этих методов позволяет компенсировать их индивидуальные недостатки и обеспечить более точное представление о состоянии горного массива.

Практическая значимость применения этих методов заключается в своевременном выявлении потенциально опасных зон, разработке превентивных мер по предотвращению аварийных ситуаций и повышении общей устойчивости горных выработок. Их использование способствует оптимизации процессов добычи полезных ископаемых, снижению рисков и увеличению производственных показателей.

Результаты исследования подтверждают, что современные геофизические методы являются ключевыми инструментами для мониторинга геомеханического состояния горных массивов. Дальнейшее развитие и интеграция этих методов откроют новые возможности для углубленного понимания и безопасной эксплуатации природных ресурсов.

Список литературы

1. Новиков А.О., 2023. Математическое моделирование деформирования породных массивов, вмещающих подготовительные выработки угольных шахт, закрепленных с использованием анкерных систем. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 10, № 3, С. 78-82. DOI 10.15372/FPVGN2023100312.
2. Ткач С.М., Курилко А.С., Соловьев Д.Е., 2021. Роль теплофизических исследований в обеспечении эффективности и безопасности эксплуатации шахт и рудников криолитозоны. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 1, С. 154-160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.
3. Есина Е.Н., Кирков А.Е., Доскалов А.И., 2021. Оценка геомеханического состояния горнотехнической системы месторождения медно-порфириновых руд Кальмакыр. *Процессы в геосредах*, № 3(29), С. 1212-1217.
4. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др., 2022. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой. *Записки Горного института*, Т. 253, С. 61-70. DOI 10.31897/PMI.2022.2.
5. An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mech Rock Eng* 56, 3359–3375 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>
6. Созонтова Е.А., 2024. Учет изменения геомеханических свойств пород по направлениям при оценке устойчивости скважин. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 461-470
7. Макаров А.Б., Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г. и др., 2016. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 27-38.
8. Шевченко М.Д., Мельник В.В., 2023. Исследование геомеханического состояния породного массива в подземных условиях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 1-1, С. 471-479. DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-471-479.
9. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2024. Оценка точности и информативности геофизических методов для решения задач картирования структурных неоднородностей в шахте. *Проблемы недропользования*, № 1(40), С. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090.
10. Мельник В.В., Далатказин Т.Ш., Замятин А.Л., 2022. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 122-131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122.
11. Гликман А.Г., 2002. Физика и практика спектральной сейсморазведки. НТФ "Геофизпрогноз". URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (дата обращения: 27.02.2023).

References

1. Novikov A.O., 2023. Matematicheskoe modelirovaniye deformirovaniya porodnykh massivov, vmeshchayushchikh podgotovitel'nye vyrabotki ugol'nykh shakht, zakreplennykh s ispol'zovaniem ankernykh system [Mathematical modeling of deformation of rock massifs containing development workings of coal mines, reinforced using anchor systems]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 10, № 3, P. 78-82. DOI 10.15372/FPVGN2023100312.
2. Tkach S.M., Kurilko A.S., Solov'ev D.E., 2021. Rol' teplofizicheskikh issledovaniy v obespechenii effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii shakht i rudnikov kriolitozony [The role of thermophysical studies in ensuring the efficiency and safety of operation of

mines and pits in the cryolithozone]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 8, № 1, P. 154-160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.

3. Esina E.N., Kirkov A.E., Doskalov A.I., 2021. Otsenka geomekhanicheskogo sostoyaniya gornotekhnicheskoi sistemy mestorozhdeniya medno-porfiritovykh rud Kal'-makyr [Assessment of the geomechanical state of the mining system of the Kalmakyr copper-porphyry ore deposit]. *Protsessy v geosredakh*, № 3(29), P. 1212-1217.

4. Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kuziev D.A. i dr., 2022. Prognozirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva pri otrabotke solyanykh mestorozhdenii s zakladkoi [Forecasting the geomechanical state of the massif during the development of salt deposits with backfill]. *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 253, P. 61-70. DOI 10.31897/PMI.2022.2.

5. An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mech Rock Eng* 56, 3359–3375 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>

6. Sozontova E.A., 2024. Uchet izmeneniya geomekhanicheskikh svoistv porod po napravleniyam pri otsenke ustoichivosti skvazhin [Accounting of changes in geomechanical properties of rocks in directions when assessing well stability]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 461-470

7. Makarov A.B., Rasskazov I.Yu., Saksin B.G. i dr., 2016. Geomekhanicheskoe obosnovanie parametrov kamernoi sistemy razrabotki pri perekhode na podzemnyi sposob dobychi rud [Geomechanical substantiation of the parameters of the chamber mining system during the transition to underground ore mining]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 27-38.

8. Shevchenko M.D., Mel'nik V.V., 2023. Issledovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya porodnogo massiva v podzemnykh usloviyakh [Study of the geomechanical state of the rock mass in underground conditions]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 1-1, P. 471-479. DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-471-479.

9. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2024. Otsenka tochnosti i informativnosti geofizicheskikh metodov dlya resheniya zadach kartirovaniya strukturnykh neodnorodnostei v shakhte [Assessment of the accuracy and information content of geophysical methods for solving problems of mapping structural heterogeneities in a mine]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(40), P. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090.

10. Mel'nik V.V., Dalatkazin T.Sh., Zamyatin A.L., 2022. Reshenie zadach bezopasnosti vedeniya podzemnykh gornykh rabot pri otrabotke ugol'nykh lav s ispol'zovaniem sovremennykh metodov geofiziki [Solving the safety problems of underground mining operations during coal face development using modern geophysical methods]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 122-131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122.

11. Glikman A.G., 2002. Fizika i praktika spektral'noi seismorazvedki [Physics and praxis of spectral seismic exploring]. NTF "Geofizprognoz". URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (data obrashcheniya: 27.02.2023).



ГЕОФИЗИКА

УДК 550.834

Бурцев Григорий Евгеньевич

аспирант, инженер 1 категории,
отдел сейсморазведочных работ,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40;
АО «ТомскНИПИнефть»,
634027, Россия, г. Томск, пр. Мира, д.72
e-mail: Grigory.E.Burtsev@outlook.com

Немирович-Данченко Михаил Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор,
кафедра комплексной информационной без-
опасности электронно-вычислительных систем,
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники
e-mail: nmm@fb.tusur.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВЫХ ВСТУПЛЕНИЙ НА ИСХОДНЫХ 2D СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Аннотация:

В статье рассматривается вопрос автоматического определения моментов времени первых вступлений сейсмических волн на данных 2D сейсморазведки с применением специально построенной и обученной нейронной сети. Описываются в общих чертах существующие подходы к автоматическому пикированию первых вступлений с применением нейронных сетей и без них. Дается характеристика актуальности проведенного исследования, приводится краткая информация о подготовке исходных данных к дальнейшему их применению для обучения модели. Приведено описание разработанного алгоритма, применяющего машинное обучение и специально обученную нейронную сеть. В основе предлагаемого способа лежит расчет накопленной зарегистрированными сейсмическими сигналами энергии, анализируемой до момента прихода первых вступлений и после него. При этом принимается, что сам найденный момент первых вступлений разделяет сейсмический сигнал на две части: на шумовую компоненту, представленную микросейсмами, и на полезную часть сигнала. Оценена точность полученных результатов, при этом в качестве достоверных эталонов, имеющих абсолютную точность, принимаются вручную определенные первые вступления. В качестве исходных данных применялись полевые сейсмические данные с месторождений Западной Сибири. Приводится проверка качества работы алгоритма, примененного к исходным данным с трех месторождений. Исходные полевые данные не подвергались предварительной обработке от шумов, чтобы построенная модель научилась правильно учитывать их наличие и качественно определять моменты времени первых вступлений. Исследование, описываемое в статье, посвящено только 2D сейсмической съемке, трехмерные сейсмические кубы в данной статье не рассматриваются.

Ключевые слова: Первые вступления, автоматическое пикирование, микросейсмы, сейсмический шум, нейронные сети, машинное обучение, 2D сейсмические данные.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.096

Burtsev Grigory E.

Postgraduate Student, 1st category Engineer
of the Seismic Survey Department,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics,
40 Lenin Ave., 634050 Tomsk;
TomskNIPIneft JSC;
72 Mira Ave., 634027 Tomsk
e-mail: Grigory.E.Burtsev@outlook.com

Nemirovich-Danchenko Mikhail M.

Doctor of Physico-Mathematical Sciences,
Professor of the Department of Integrated
Information Security of Electronic Computing
Systems (Cybersecurity),
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics
e-mail: nmm@fb.tusur.ru

2D PROFILE SEISMIC WAVES FIRST BREAKS AUTOMATIC PICKING USING MACHINE LEARNING AND FULLY CONNECTED NEURAL NET

Abstract

The article discusses a new method of automatic detection of the first breaks of seismic waves. The method used is: 2D seismic data as its input with applying the specially trained neural net mode. Existing modern approaches to the first breaks detection are described in short. Some of these approaches use neural nets and some do not. The characteristics of relevance of conducted research is provided, the process of initial field seismic data preparation for the training the model is explained. The researched algorithm of automatic first breaks picking, that uses machine learning and special trained neural net, is given in details. The calculation of accumulated seismic traces energy lies in the basis of the proposed first breaks detection method. In the research it is presumed that the time moment of seismic waves first breaks separates seismic signal into two pieces: the first one, which is noise microseismic part, and the second one that is seismic waves information part. The accuracy of received during the investigation results is estimated in the paper. The reference first breaks time moments were taken from manual picks. The seismic field data from three of Western Siberia oilfields were used as initial input data to train and test the neural net. Seismic input data were not preprocessed to reduce noise that exists in raw data. This noise was not removed from the input in order to help the neural net adapt its parameters to confidently pick first breaks of seismic waves from raw field data. The research that is described in this text is dedicated only to 2D seismic data, 3D field seismic cubes were not considered.

Key words: first breaks, automatic picking, microseism, seismic noise, neural net, machine learning, 2D seismic data.

Введение

В сейсморазведке методом общей глубинной точки с целью учета влияния неровностей рельефа и верхней низкоскоростной части разреза применяется ввод статических поправок, который выполняет сдвиг сейсмических трасс к некоторому общему заранее определенному уровню приведения. Чем точнее определены моменты времени первых вступлений сейсмических волн, тем выше качество введенных статических поправок [1]. Однако само пикирование первых вступлений в общем случае на реальных данных сейсморазведки является крайне непростой задачей. В случае пикирования первых вступлений вручную сложность процедуры определяется значительным количеством часов, которые специалист-обработчик полевых сейсмических данных должен на нее потратить, особенно если речь идет о 3D сейсмических данных [2]. В случае автоматизированного либо автоматического пикирования перед запрограммированным алгоритмом, выполняющим определение первых вступлений, возникает проблема, связанная с неоднозначностью отделения области микросейсм от области полезного сейсмического сигнала.

Существуют различные алгоритмы автоматического определения моментов времени первых вступлений сейсмических волн. В самом простом случае они основаны на расчете некоторой энергетической характеристики сейсмического сигнала, это так называемые пороговые алгоритмы [3], которые неплохо работают на низкозашумленных данных [4]. В общем виде схематично работа порогового алгоритма приведена на рис. 1.

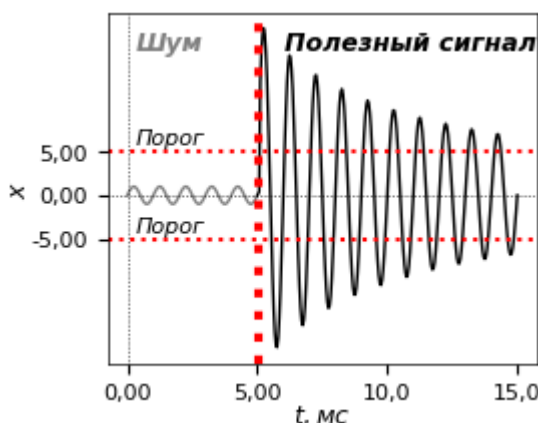


Рис. 1. Схема работы порогового алгоритма. Первое вступление обнаруживается при достижении абсолютной амплитудой x сигнала заранее заданного порогового значения ($+5,0$ и $-5,0$) в момент времени $t_0 = 5$ мс

Разумеется, необязательно исследовать непосредственно сам зарегистрированный сигнал, вместо этого можно анализировать среднеквадратичное значение этого сигнала, рассчитанное в определенном временном окне [3].

Немного более сложная группа алгоритмов исследует рассчитанные характеристики сигнала сразу в двух временных окнах разной длины, а именно в коротком и длинном скользящих окнах, в которых непрерывно вычисляется значение, характеризующее энергию сейсмической трассы во временном окне. Простейший из этих алгоритмов, называемый *STA / LTA* алгоритмом оценки фрактальной размерности, был представлен Алленом еще в 1978 г. [5]. По данному алгоритму выполняется вычисление значений характеристической функции CF , задаваемой выражением (1) [6]:

$$CF_i = x_i^2 + C_i \times \dot{x}_i^2, \quad (1)$$

где $\dot{x}_i$ – это производная сигнала x по времени; C_i – это константа взвешивания, которая находится по выражению (2):

$$C_i = \frac{\sum_{j=1-W_{TA}+1}^i |x_j|}{\sum_{j=1-W_{TA}+1}^i |\dot{x}_j|}, \quad (2)$$

где W_{TA} – длина заданного временного окна; $|\dot{x}_j|$ – абсолютная величина дискретной производной по времени, которая находится как $|\dot{x}_j| = |x_j - x_{j-1}|$. Тогда выражения характеристик сигнала в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах могут быть найдены из выражений (3) и (4), соответственно [7]:

$$STA_i = \frac{1}{W_{STA}} \times \sum_{j=i-W_{STA}+1}^i CF_j, \quad (3)$$

$$LTA_i = \frac{1}{W_{LTA}} \times \sum_{j=i-W_{LTA}+1}^i CF_j; \quad (4)$$

где W_{STA} и W_{LTA} – длины короткого и длинного временных окон, соответственно. По внезапному росту отношения λ_i , определяемого выражением (5), можно судить об окончании области регистрируемых микросейсм и начале области полезного сигнала [7, 8]. Схематично длинные и короткие временные окна изображены на рис. 2.

$$\lambda_i = \frac{STA_i}{LTA_i}. \quad (5)$$

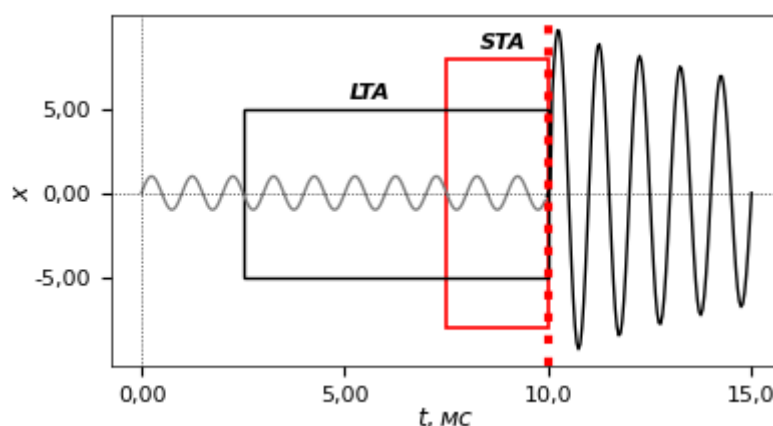


Рис. 2. Изображение короткого (STA) и длинного (LTA) временных окон с временем прихода первых вступлений $t_0 = 10$ мс

Существует также авторегрессионный алгоритм, в котором во временном окне W_{TA} оценивается значение сигнала в будущий момент времени при помощи авторегрессионной функции [9]. По внезапному росту ошибок предсказания ε_t можно заключить, что предсказанное значение сигнала лежит уже вне области микросейсм. Сигнал $x(t)$ выражается через авторегрессионную функцию AR (6):

$$X_t = \sum_{m=1}^p b_m X_{t-m} + \varepsilon_t, \quad (6)$$

где X_t – вектор семплов сигнала; b_m – коэффициенты авторегрессии, найденные при помощи метода наименьших квадратов. Порядок p авторегрессии в работе [9] принимается как $p = 4$. Вместо характеристической функции здесь исследуется ошибка предсказания ε_t , которая в области шумов-микросейсм, как ожидается, будет примерно совпадать с шумом. Рост данной ошибки предсказания при этом связывается с переходом в область полезного сигнала.

С развитием информационных технологий распространение получили подходы к автоматическому пикированию, использующие нейронные сети и машинное обучение. Для решения данной задачи могут применяться различные виды нейронных сетей. Это может быть полносвязная нейронная сеть, многоуровневый перцептрон, имеющий несколько промежуточных слоев, каждый из которых имеет свою функцию активации. В таких нейронных сетях каждый узел, именуемый также нейроном, текущего слоя математически связан с каждым нейроном предыдущего слоя. Данные функции активации обычно принимаются нелинейными, так как в противном случае все зависимости промежуточных слоев могут быть сведены к линейной зависимости между входом x модели и ее выходом y [10].

В работе [11] для пикирования первых вступлений применяется нейронная сеть Кохонена. В ней все узлы выходного слоя связаны друг с другом, а нейроны входного слоя не имеют друг с другом никаких связей, но каждый нейрон входного слоя связан с каждым нейроном выходного слоя [12]. Сперва авторы [11] предлагают определить приблизительное время первых вступлений сейсмических волн с помощью анализа сигналов в скользящих окнах, выполнить фильтрацию полученных результатов простым отбором по пороговым значениям кажущихся скоростей сейсмических волн [13] и лишь затем использовать нейронную сеть Кохонена.

Сверточные нейронные сети (CNN), широко используемые для анализа изображений, могут быть применены и для выделения полезной части регистрируемого сейсмического сигнала [14]. Данные нейронные сети имеют устойчивость к помехам во входных данных [15], являясь одновременно с этим довольно гибкими и приспособляемыми к различным подаваемым на вход данным [16].

В исследовании, описываемом в данной статье, применена специальная реализация полносвязной нейронной сети, выполняющей автоматическое определение первых вступлений на исходных 2D сейсмических данных. Нейронная сеть на вход принимает специальным образом рассчитанную в интервалах энергетическую характеристику сейсмических трасс, для чего эти трассы отображаются в их фазовое пространство. Определение первых вступлений при помощи построенной обученной модели выполняется автоматически, от специалиста, однако, требуется выполнять контроль полученных результатов. 3D исходные сейсмические данные в настоящей статье не рассматриваются.

1 Полносвязная нейронная сеть для автоматического пикирования первых вступлений сейсмических волн

1.1 Отображение сейсмического сигнала в фазовое пространство

Для начала условно примем, что сейсмический сигнал $x(t)$, регистрируемый приемником некоторой сейсмической трассы, в области микросейсм имеет следующий вид (7):

$$x(t) = C_0 \sin(\omega t), \text{ при } t < t_0, \quad (7)$$

где C_0 – константа, малая по значению, близкая к нулю; t – время; $\omega = 2\pi$; t_0 – момент времени регистрации первых вступлений. После регистрации первых вступлений примем, что сигнал (7) принимает вид (8), постепенно затухающий с ростом времени t :

$$x(t) = \frac{C_0 \sin(\omega t)}{Ct}, \text{ при } t \geq t_0, \quad (8)$$

где C – константа.

Производная по времени сигнала (7) в таком случае примет вид (9):

$$\dot{x}(t) = C_0 \omega \cos(\omega t), \text{ при } t < t_0, \quad (9)$$

а при времени $t \geq t_0$ производная сигнала (8) по времени становится вида (10):

$$\dot{x}(t) = \frac{C_0(\omega t \cos(\omega t) - \sin(\omega t))}{Ct^2}, \text{ при } t \geq t_0. \quad (10)$$

На рис. 3 представлен синтетический сейсмический сигнал $x(t)$ в координатах $(x; t)$, $(\dot{x}; t)$. Регистрация первых вступлений при этом происходит в момент времени t_0 , после которого амплитуды сигнала $x(t)$ резко возрастают. До достижения момента времени t_0 сигнал имеет незначительные амплитуды колебаний, соответствующие микросейсмическому шуму.

Если отобразить синтетический сигнал $x(t)$ в координатах $(x; \dot{x})$, получится фазовый портрет сигнала. Данный фазовый портрет приведен ниже на рис. 4. В момент t_0 сигнал резко отскакивает от своих колебаний в окрестности точки с координатами $(0; 0)$, приобретая значительную амплитуду, но затем, с ростом времени t , при $t \rightarrow \infty$, сигнал опять приближается к общему аттрактору системы, находящемуся в точке $(0; 0)$ [17].

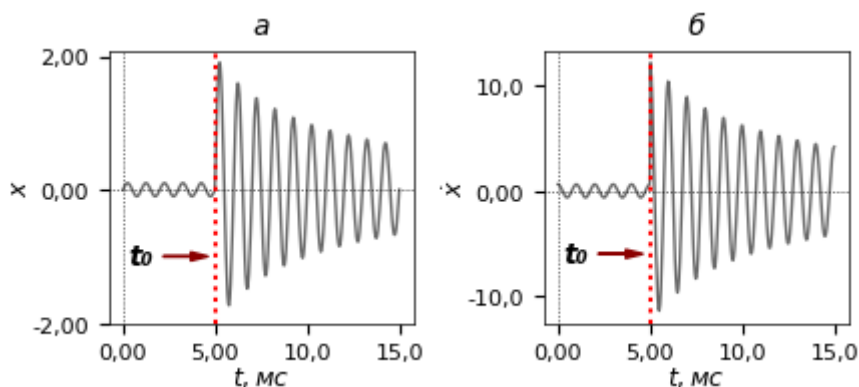


Рис. 3. Слева направо: а) затухающий после $t_0 = 5$ мс синтетический сигнал $x(t)$; б) производная по времени от данного затухающего сигнала

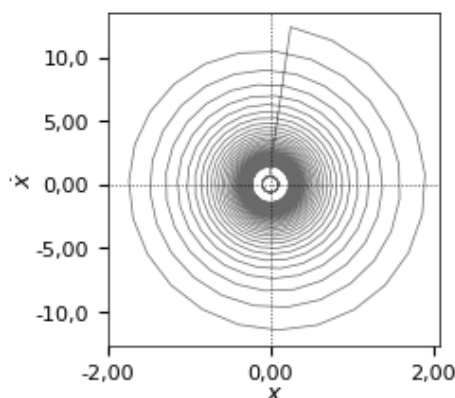


Рис. 4. Фазовый портрет синтетического сигнала $x(t)$

В случае дискретного синтетического сигнала, представленного на рис. 5 а, выполним разбиение его на интервалы, строго по моментам времени, когда сигнал достигает своих экстремумов (рис. 5 б). Отдельно отметим область локального подынтервала, в пределах которой сигнал совершает одностороннее колебание, но не пересекает нулевое значение своей амплитуды (рис. 5 в). Данный локальный подынтервал понадобится далее для формирования тензора исходных данных, подаваемого на вход модели.

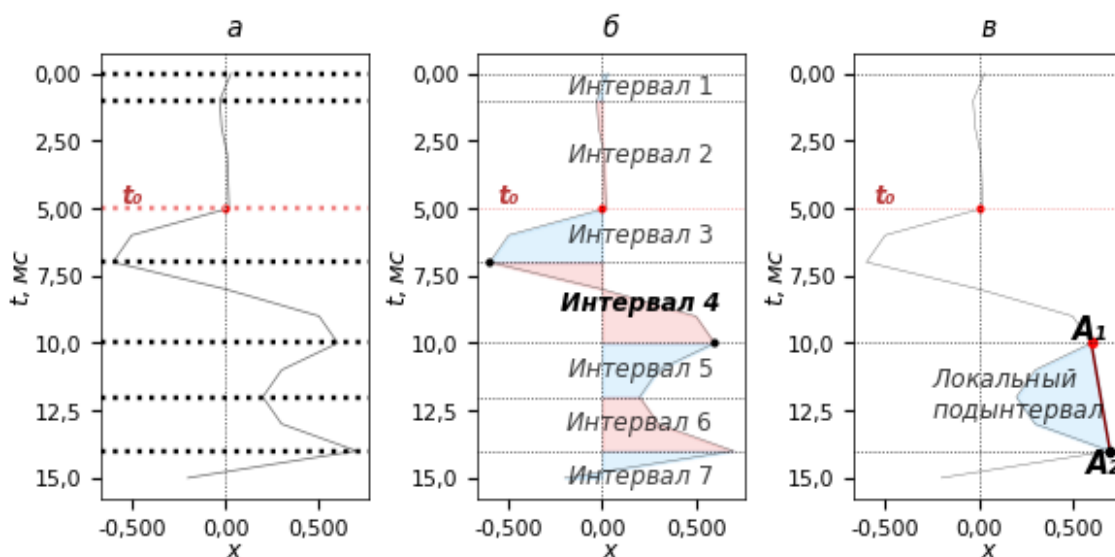


Рис. 5. Слева направо:
а) дискретный синтетический сейсмический сигнал; б) экстремумы сигнала;
в) локальный подынтервал, в пределах которого сигнал не пересекает своего нуля

Дискретный сигнал из рис. 5 можно отобразить на плоскости в виде фазового портрета, аналогично непрерывному синтетическому сигналу (см. рис. 6 а). Локальный подынтервал (рис. 6 б) при этом тот же самый, что и на рис. 5 в. Точка A_1 при этом является точкой локального аттрактора сигнала, который совершает один оборот по часовой стрелке вокруг нее, достигая точки A_2 . Точка A_2' совпадает с точкой A_1 на плоскости фазового портрета, но относится к другому, более позднему моменту времени.

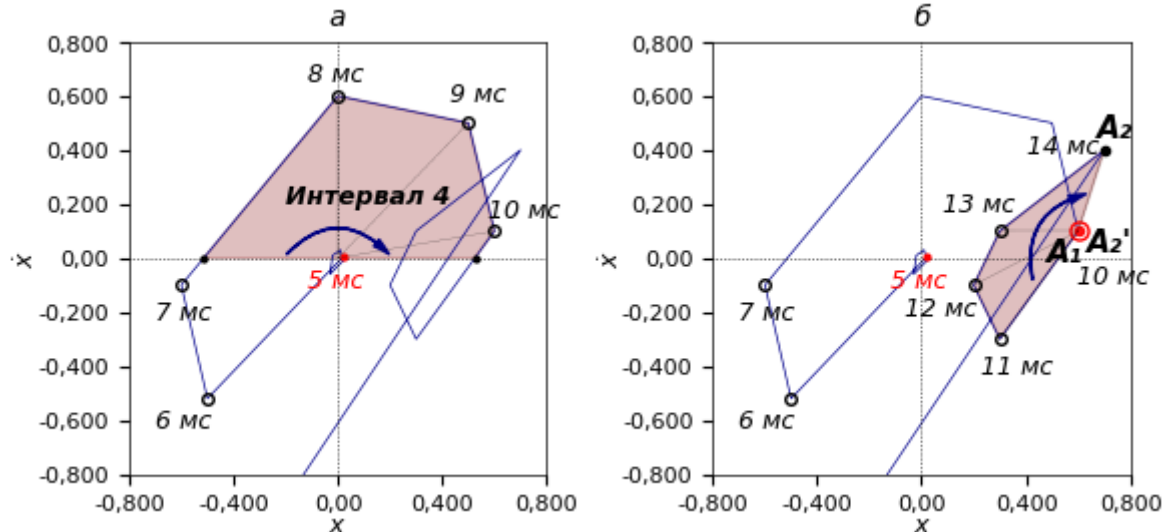


Рис. 6. Фазовый портрет синтетической дискретной сейсмической трассы.

Слева направо: а) закрашенный интервал 4 соответствует таковому на рис. 5 б;

б) закрашенная область – это локальный подынтервал, который соответствует таковому из рис. 5 в

Далее отметим, что данный сигнал можно растянуть вдоль оси времени t . В этом случае получаем дискретную параметрическую кривую данного сигнала (рис. 7 а). В данном трехмерном случае становится видно, как соотносятся между собой в пространстве параметрической кривой точки A_2 и A_2' (рис. 7 б).

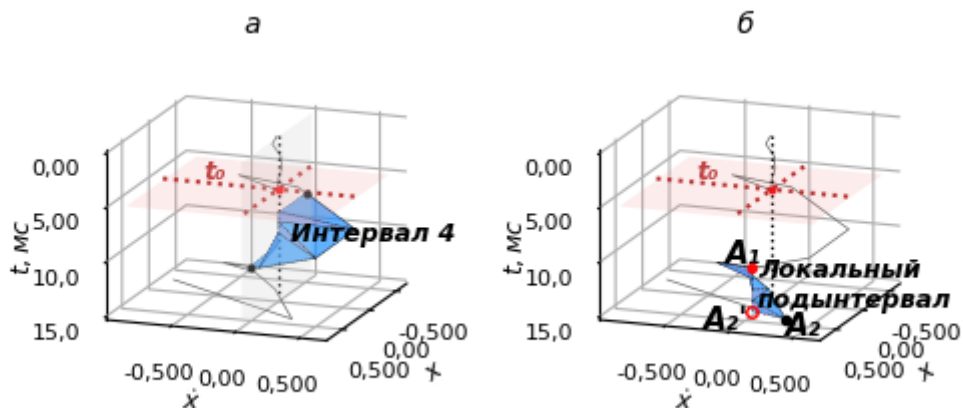


Рис. 7. Параметрическая кривая дискретной синтетической сейсмической трассы.

Слева направо: а) интервал 4 соответствует таковому на рис. 5 б;

б) локальный подынтервал соответствует локальному подынтервалу из рис. 5 в

Примем, что закрашенные синим цветом области, отмеченные на рис. 7, которые формирует сигнал $x(t)$, характеризуют энергию сигнала в данных интервалах, что будет применено в дальнейшем при формировании тензора входных данных. Каждую такую площадь $\sum area_{\Delta}$ в пределах интервала можно аналитически посчитать как сумму площадей треугольников $area_{\Delta}$, применяя формулу Герона (11):

$$area_{\Delta} = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}, \quad (11)$$

где a, b, c – длины сторон треугольника; s – половина периметра треугольника в пространстве.

1.2 Формирование нейронной сети и тензора исходных данных

Тензором называется массив элементов произвольного уровня вложенности. Обычная матрица, в которой элементы расположены по ее столбцам и строкам, – это тензор второго порядка. Вектор элементов – тензор первого порядка. В формируемой нейронной сети для ее обучения и дальнейших расчетов применено формирование тензора данных *tens* третьего порядка, который в общем виде представлен выражением (12):

$$tens = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} t_{1,1} & l_{1,1} & x_{1,1} \\ x_{desc,1,1} & x_{max,1,1} & \dot{x}_{max,1,1} \\ a_{tot,1,1}^+ & a_{tot,1,1}^- & \dot{a}_{tot,1,1}^+ \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} t_{1,n} & l_{1,n} & x_{1,n} \\ x_{desc,1,n} & x_{max,1,n} & \dot{x}_{max,1,n} \\ a_{tot,1,n}^+ & a_{tot,1,n}^- & \dot{a}_{tot,1,n}^+ \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} t_{m,1} & l_{m,1} & x_{m,1} \\ x_{desc,m,1} & x_{max,m,1} & \dot{x}_{max,m,1} \\ a_{tot,m,1}^+ & a_{tot,m,1}^- & \dot{a}_{tot,m,1}^+ \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} t_{m,n} & l_{m,n} & x_{m,n} \\ x_{desc,m,n} & x_{max,m,n} & \dot{x}_{max,m,n} \\ a_{tot,m,n}^+ & a_{tot,m,n}^- & \dot{a}_{tot,m,n}^+ \end{bmatrix} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $i = \overline{1, m}$, m – количество семплов в трассе; $j = \overline{1, n}$, n – общее количество анализируемых сейсмических трасс, имеющих на профиле; $t_{i,j}$ – двойное время пробега; $l_{i,j}$ – оффсет; $x_{i,j}$ – зарегистрированные амплитуды, искусственно введенная переменная $x_{desc,i,j} = 1$, если $\dot{x}_{i,j} \leq 0$, и $x_{desc,i,j} = 0$, если $\dot{x}_{i,j} > 0$, $\dot{x}_{i,j}$ – дискретная производная сигнала по времени; $x_{max,i,j}$ – максимальное по модулю значение амплитуды на участке трассы между двумя экстремумами дискретного сигнала $x_{i,j}$. Величины $a_{tot,m,1}^+$, $a_{tot,m,1}^-$ и $\dot{a}_{tot,m,1}^+$ – это рассчитанные значения максимальных накопленных на интервалах энергий сейсмических трасс, которые в данной нейронной сети характеризуются площадью закрученной ленты, вычисляемой как сумма площадей треугольников при помощи формулы Герона (11) в фазовом пространстве. Так, $a_{tot,m,1}^+$ – максимальная накопленная в пределах интервала энергия трассы в системе координат $(x; \dot{x}; t)$ (см. рис. 7 а); $\dot{a}_{tot,m,1}^+$ – то же самое, но в координатах $(\dot{x}; \ddot{x}; t)$; $a_{tot,m,1}^-$ – максимальная накопленная энергия на локальном подынтервале в системе координат $(x; \dot{x}; t)$ (см. рис. 7 б), при этом величина $a_{tot,m,1}^- = 0$, если на текущем интервале нет локального аттрактора системы, формирующего локальный подынтервал.

Величины $x_{i,j}$ и $\dot{x}_{i,j}$ в формируемом тензоре предварительно нормированы на несмещенную оценку среднеквадратичного отклонения исходных амплитуд сигнала $x_{i,j}^*$ и производных сигнала $\dot{x}_{i,j}^*$, в которых зарегистрированные данные сейсмических трасс принадлежат одному пункту возбуждения. Обучение модели выполнено на основе данных с 1600 сейсмических трасс Колотушного месторождения. Вступления, принятые за эталоны и применяемые в качестве образцов при обучении модели, были пропикированы вручную.

Итоговая архитектура нейронной сети приведена на рис. 8. В модели имеются три промежуточных скрытых плотных слоя (*Плотный 1*, *Плотный 2*, *Плотный 3*), в которых применяется ректифицированная функция активации. Каждый нейрон текущего слоя связан с каждым нейроном предыдущего. *Выходной плотный* слой выполняет преобразование полученных значений в вероятности $p_i \in [0; 1]$, $i = \overline{1, m}$, m – количество дискретных семплов данных. Данные вероятности определяют принадлежность

регистрируемого сигнала к микросейсам либо к полезной сейсмической информации после первых вступлений. *Выходной бинарный* слой по заданному пороговому значению преобразует вероятности p_i к бинарной величине p_i' , при этом $p_i' = 0$ означает микросеймы, а $p_i' = 1$ означает область полезной сейсмической информации. На рис. 8 (*None, None, 9*) означает размерность тензора на входе слоя и на его выходе. При этом *None* означает произвольный размер. *Обрезочный* слой оставляет лишь первые 1501 семплов данных, применяемых далее для поиска вступлений. Здесь предполагается, что первые вступления не могут находиться в поздних временах t , поэтому оставшая часть трассы предварительно отбрасывается из анализа для того, чтобы облегчить вычисления. По умолчанию трассы группируются в наборы по 256 штук, подаваемые на вход модели, однако размер таких наборов является гиперпараметром, который можно менять.

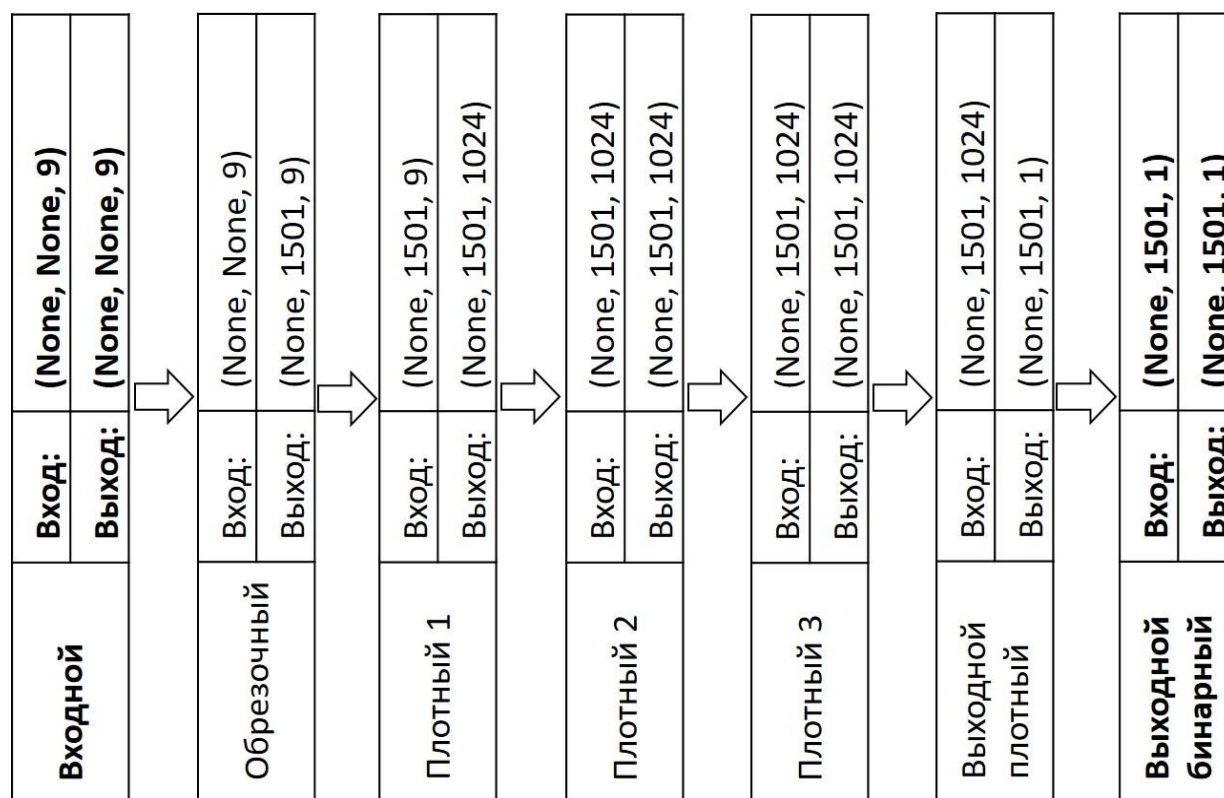


Рис. 8. Архитектура нейронной сети для пикирования первых вступлений.
 В модели имеются следующие слои: входной, обрезочный, плотный 1, плотный 2, плотный 3, выходной плотный, выходной бинарный

2 Апробация построенной модели

Из данных с профиля Колотушного месторождения первые 1280 трасс использовались для обучения нейронной сети, по оставшимся 320 трассам осуществлялся контроль качества работы модели. Всего применены данные с 1600 сейсмических трасс. Построение модели и ее обучение выполнено в библиотеке *TensorFlow*; каждый проход обучения модели именуется эпохой. Процедура обучения решено остановить на 50-й эпохе из-за выполаживания графика функции точности (*Accuracy*) (рис. 9 а) (13), это означает, что дальнейшее обучение на текущем наборе данных не имеет смысла.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}, \quad (13)$$

где TP , TN , FP , FN – это количество правильно определенных семплов полезной части сигнала, количество правильно определенных семплов микросеймов, количество не-

правильно определенных семплов полезной части сигнала и количество неправильно определенных семплов микросейсм, соответственно [18].

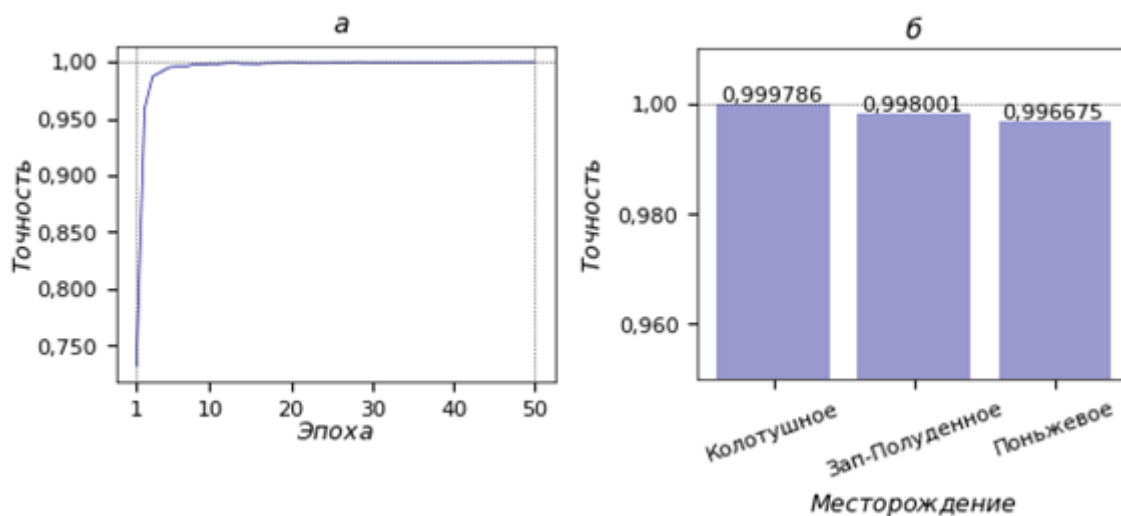


Рис. 9. Слева направо:

- а) график точности работы модели по данным Колотушного месторождения;
- б) проверка работы модели по данным Колотушного, Западно-Полуденного и Поньжевого месторождений

Дополнительно проведена проверка работы модели была на данных с Западно-Полуденного и Поньжевого месторождений. Гистограмма с подписанными значениями точности приведена на рис. 9 б. Демонстрация работы полученной модели приведена на рис. 10 а. Красными точками на сейсмограмме отмечены полученные значения времен первых вступлений. Модель уверенно находит вступления, которые расположены в окрестности горизонтальной линии t_0 (рис 10 б).

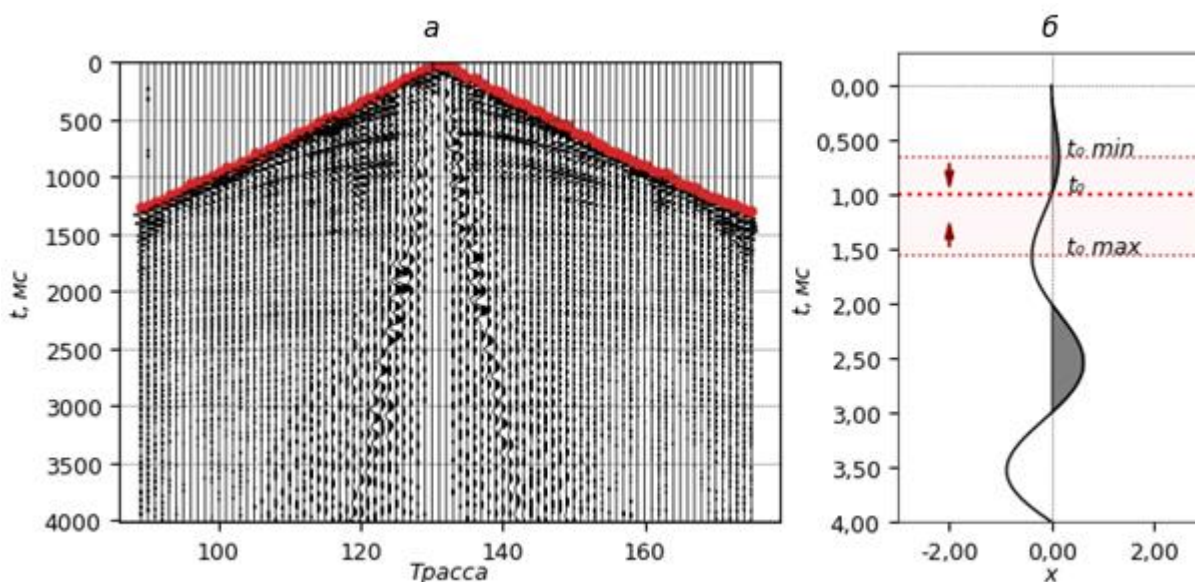


Рис. 10. Слева направо:

- а) пример работы модели на сейсмограмме с Колотушного месторождения, где красным цветом отмечены найденные моделью первые вступления;
- б) изображение области, в пределах которой модель находит первые вступления. Они располагаются в окрестности горизонтальной линии t_0 , от $t_0.min$ до $t_0.max$

Заключение

Результаты точности работы полученной нейронной сети (см. рис. 9 б) позволяют заключить, что построенная нейросетевая модель для автоматического пикирования первых вступлений способна качественно выполнять свою работу, во всяком случае на протестированных полевых данных с месторождений Западной Сибири. При этом само обучение модели выполнялось только лишь по данным Колотушного месторождения, но, уловив закономерности изменения амплитуд сейсмического сигнала, модель стала способной определять, относится ли каждый проверяемый семпл данных к микросейсмическому шуму либо к полезной части сигнала и на данных с месторождений, не участвовавших в обучении модели.

В проведенном исследовании вместо усложнения архитектуры самой нейронной сети упор сделан на предварительном расчете энергетических характеристик сейсмических трасс с отображением дискретных сигналов в фазовое пространство. Полученные первые вступления программой, написанной на языке *Python*, записываются в *segu* файл, в байты с 233 по 236, предназначенные специально для записи произвольной дополнительной информации, согласно стандарту *SEG Y rev 1*.

Исследование на текущий момент посвящено только 2D сейсмическим профилям, решение для 3D полевых сейсмических данных потребует модификации примененного алгоритма.

Список литературы

1. Souza W.E., Cerqueira A.G., Porsani M.J., 2024. First-break prediction in 3-D land seismic data using the dynamic time warping algorithm. *Geophysical Journal International*, 237: pp. 402–418. DOI: 10.1093/gji/ggae048.
2. Yin Y., Han L., Zhang P., 2023. First-Break Picking of Large-Offset Seismic Data Based on CNNs with Weighted Data. *Remote Sensing*, 15(2), 356. DOI: 10.3390/rs15020356.
3. Trnkoczy A., 2012. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *Potsdam, Germany: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. DOI: doi.org/0.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1.
4. Sharma B.K., Amod Kumar, Murthy V.M., 2010. Evaluation of Seismic Events Detection Algorithms. *Geological Society of India*, Vol.75, pp. 533-538. DOI: 10.1007/s12594-010-0042-8.
5. Vassallo M., Satriano C., Lomax F., 2012. Automatic Picker Developments and Optimization: A Strategy for Improving the Performances of Automatic Phase Pickers. *Seismological Research Letters*. DOI: 10.1785/gssrl.83.3.541.
6. Küperkoch L., Meier T., Diehl T., 2011. Automated Event and Phase Identification. *Potsdam, Germany: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch16.
7. Li X., Shang X., Wang Z., Dong L., Weng L., 2016. Identifying P-phase arrivals with noise: An improved kurtosis method based on DWT and STA/LTA. *Journal of Applied Geophysics*. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.07.022.
8. Shen T., Tuo X., Li H., Liu Y., Rong W., 2018. A first arrival picking method of microseismic data based on single time window with window length independent. *Springer Nature*. DOI: 10.1007/s10950-018-9789-y.
9. Stampa J., Eckel F., Keers H., Lebedev S., Meier T., AlpArray and SWATH-D Working Groups, 2024. Automated measurement of teleseismic P -, SH - and SV-wave arrival times using autoregressive prediction and the instantaneous phase of multicomponent waveforms. *Geophysical Journal International*. DOI: 10.1093/gji/ggae307.
10. Feng J., Lu Sh., 2019. Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks. *Journal of Physics: Conf. Series 1237 (2019) 022030*. DOI: 10.1088/1742-6596/1237/2/022030.

11. Приезжев И.И., Иванов П.Д., Гаврилов С.С., Мамаев Д.А., Калинин А.Ю., Стенина Ю.В., 2022. Автоматическая пикировка первых вступлений с использованием машинного обучения. *Геофизика*, № 1, С. 90-96. DOI: 10.34926/geo.2022.65.65.001.
12. Shen Yu-Ju, Wang Ming-Shi, 2005. Apply neural schemes to deformation objects. *Taiwan: ICGST-GVIP Journal*, Vol. 5, Issue 4.
13. Приезжев И.И., Мамаев Д.А., Стенина Ю.В., 2021. Использование элементов машинного обучения для автоматической пикировки первых вступлений. *Геомодель 2021, 23-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа*. Москва: Издательство ООО «ЕАГЕ Геомодель», С.114.
14. Münchmeyer J., Woollam J., Rietbrock A., Tilmann F., Lange D., Bornstein T., Diehl T., Giunchi C., Haslinger F., Jozinovi'c D., Michelini A., Saul J., Soto H., 2021. Which picker fits my data? A quantitative evaluation of deep learning based seismic pickers. *arXiv:2110.13671v1 [physics.geo-ph]*. DOI: 10.48550/arXiv.2110.13671.
15. Johnson Sean W., Chambers Derrick J. A., Boltz Michael S., Koper Keith D., 2021. Application of a convolutional neural network for seismic phase picking of mining-induced seismicity. *Geophysical Journal International*, Volume 224, Issue 1. DOI: 10.1093/gji/ggaa449
16. St-Charles Pierre-Luc, Rousseau B., Ghosn J., Nantel Jean-Philippe, Bellefleur G., Schetselaar E., 2021. A Multi-Survey Dataset and Benchmark for First Break Picking in Hard Rock Seismic Exploration. *Fourth Workshop on Machine Learning and the Physical Sciences (NeurIPS 2021)*.
17. Krakovská H., Kuehn C., Longo I.P., 2024. Resilience of Dynamical Systems. *European Journal of Applied Mathematics*, 35: 155–200. DOI: 10.1017/S0956792523000141.
18. Terven J., Cordova-Esparza Diana M., Ramirez-Pedraza A., Chavez-Urbiola Edgar A., Romero-Gonzalez Julio A., 2023. Loss Functions and Metrics in Deep Learning. *arXiv:2307.02694*. DOI: 10.48550/arXiv.2307.02694.

References

1. Souza W.E., Cerqueira A.G., Porsani M.J., 2024. First-break prediction in 3-D land seismic data using the dynamic time warping algorithm. *Geophysical Journal International*, 237: pp. 402–418. DOI: 10.1093/gji/ggae048.
2. Yin Y., Han L., Zhang P., 2023. First-Break Picking of Large-Offset Seismic Data Based on CNNs with Weighted Data. *Remote Sensing*, 15(2), 356. DOI: 10.3390/rs15020356.
3. Trnkoczy A., 2012. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *Potsdam, Germany: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. DOI: doi.org/0.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1.
4. Sharma B.K., Amod Kumar, Murthy V.M., 2010. Evaluation of Seismic Events Detection Algorithms. *Geological Society of India*, Vol.75, pp. 533-538. DOI: 10.1007/s12594-010-0042-8.
5. Vassallo M., Satriano C., Lomax F., 2012. Automatic Picker Developments and Optimization: A Strategy for Improving the Performances of Automatic Phase Pickers. *Seismological Research Letters*. DOI: 10.1785/gssrl.83.3.541.
6. Küperkoch L., Meier T., Diehl T., 2011. Automated Event and Phase Identification. *Potsdam, Germany: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch16.
7. Li X., Shang X., Wang Z., Dong L., Weng L., 2016. Identifying P-phase arrivals with noise: An improved kurtosis method based on DWT and STA/LTA. *Journal of Applied Geophysics*. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.07.022.
8. Shen T., Tuo X., Li H., Liu Y., Rong W., 2018. A first arrival picking method of microseismic data based on single time window with window length independent. *Springer Nature*. DOI: 10.1007/s10950-018-9789-y.

9. Stampa J., Eckel F., Keers H., Lebedev S., Meier T., AlpArray and SWATH-D Working Groups, 2024. Automated measurement of teleseismic P -, SH - and SV-wave arrival times using autoregressive prediction and the instantaneous phase of multicomponent waveforms. *Geophysical Journal International*. DOI: 10.1093/gji/ggae307.
10. Feng J., Lu Sh., 2019. Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks. *Journal of Physics: Conf. Series 1237 (2019) 022030*. DOI: 10.1088/1742-6596/1237/2/022030.
11. Priezzhev I.I., Ivanov P.D., Gavrilov S.S., Mamaev D.A., Kalinin A.Yu., Stenina Yu.V., 2022. Avtomaticheskaya pikirovka pervykh vstuplenii s ispol'zovaniem mashinnogo obucheniya [Automatic picking of the first introductions using machine learning]. *Geofizika*, № 1, P. 90-96. DOI: 10.34926/geo.2022.65.65.001.
12. Shen Yu-Ju, Wang Ming-Shi, 2005. Apply neural schemes to deformation objects. *Taiwan: ICGST-GVIP Journal*, Vol. 5, Issue 4.
13. Priezzhev I.I., Mamaev D.A., Stenina Yu.V., 2021. Ispol'zovanie elementov mashinnogo obucheniya dlya avtomaticheskoi pikirovki pervykh vstuplenii [Use of machine learning elements to automatically pick the first intros]. *Geomodel' 2021, 23-ya konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdenii nefi i gaza*. Moscow: Izdatel'stvo OOO "EAGE Geomodel", P.114.
14. Münchmeyer J., Woollam J., Rietbrock A., Tilmann F., Lange D., Bornstein T., Diehl T., Giunchi C., Haslinger F., Jozinovi'c D., Michelini A., Saul J., Soto H., 2021. Which picker fits my data? A quantitative evaluation of deep learning based seismic pickers. *arXiv:2110.13671v1 [physics.geo-ph]*. DOI: 10.48550/arXiv.2110.13671.
15. Johnson Sean W., Chambers Derrick J. A., Boltz Michael S., Koper Keith D., 2021. Application of a convolutional neural network for seismic phase picking of mining-induced seismicity. *Geophysical Journal International, Volume 224, Issue 1*. DOI: 10.1093/gji/ggaa449
16. St-Charles Pierre-Luc, Rousseau B., Ghosn J., Nantel Jean-Philippe, Bellefleur G., Schetselaar E., 2021. A Multi-Survey Dataset and Benchmark for First Break Picking in Hard Rock Seismic Exploration. *Fourth Workshop on Machine Learning and the Physical Sciences (NeurIPS 2021)*.
17. Krakovská H., Kuehn C., Longo I.P., 2024. Resilience of Dynamical Systems. *European Journal of Applied Mathematics*, 35: 155–200. DOI: 10.1017/S0956792523000141.
18. Terven J., Cordova-Esparza Diana M., Ramirez-Pedraza A., Chavez-Urbiola Edgar A., Romero-Gonzalez Julio A., 2023. Loss Functions and Metrics in Deep Learning. *arXiv:2307.02694*. DOI: 10.48550/arXiv.2307.02694.

УДК 622.831:550.34.03

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.108

Рукавишников Георгий Дмитриевич

инженер, Институт горного дела
им. Н.А. Чинакала СО РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54;
АО «ВНИМИ»,
199106, г. Санкт-Петербург, 22-я линия ВО,
корпус 1, лит. М.
e-mail: geodmiruk@gmail.com

Rukavishnikov Georgy D.

Engineer, N.A. Chinakal Mining Institute,
Siberian Branch of RAS,
630091, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt;
JSC "VNIMI",
199106 St. Petersburg,
22nd line V.O., building 1, lit. M.
e-mail: geodmiruk@gmail.com

Кирияева Татьяна Анатольевна

доктор технических наук,
зав. отдела экспериментальной геомеханики,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН
e-mail: coalmetan@mail.ru

Kiryaeva Tatyana A.

Doctor of Engineering Sciences,
Head of the Department of Experimental
Geomechanics,
N.A. Chinakal Mining Institute,
Siberian Branch of RAS,
e-mail: coalmetan@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ И РУДНИКОВ*

FEATURES OF BACKGROUND OSCILLATIONS OF SEISMIC SENSOR IN DEEP MINE CONDITIONS

Аннотация:

В статье приводится анализ непрерывной суточной записи одного из датчиков системы «GITS» в день регистрации крупнейшего за 2024 г. сейсмического толчка и последовавшей за ним серии крупных толчков на Таштагольском железорудном месторождении. Предложен новый метод обработки данных суточных непрерывных записей. Представлен анализ энергетических показателей колебаний сейсмического датчика – трехкомпонентного акселерометра. Описаны особенности распределения энергии колебаний между компонентами датчика. Обнаружена связь энергетических показателей фоновых колебаний с интенсивностью сейсмической активности массива горных пород.

Abstract:

This article provides an analysis of the daily continuous recording of one of the sensors of the GITS system during the day of registration the largest seismic event for 2024 and the series of large aftershocks at the Tashtagol iron deposit. A new method of processing data of continuous records is proposed. An analysis of the energy characteristics of the oscillations of the seismic sensor (three-component accelerometer) is presented. The features of the distribution of oscillation energy between the sensor's components are described. The connection between the energy characteristics of basic oscillations and the rock mass seismic activity level was found.

Ключевые слова: сейсмическая активность, горные удары, сейсмические датчики, непрерывная запись колебаний, полная энергия колебаний, сейсмический датчик, блочное строение массива, подземная разработка месторождений.

Key words: seismic activity, rock blast, basic oscillations, continuous recording of fluctuations, full energy of oscillations, seismic sensors, blocky rock mass, stress-strain state, underground mining.

Введение

Прогноз горных ударов и внезапных выбросов угля и газа при ведении горных работ на угольных шахтах – одна из ключевых задач при обеспечении промышленной безопасности угледобывающих предприятий [1].

В настоящее время сейсмические наблюдения в процессе отработки твердых полезных ископаемых на большой глубине стали одним из обязательных инструментов оценки уровня напряженно-деформированного состояния массива горных пород, нарушенного горными работами [2, 3]. Региональный прогноз удароопасности угольного месторождения в пределах шахтного поля ведется не только по данным, полученным

* Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 124020700085-5)

при ведении геологоразведочных работ, но и по данным сейсмоакустических наблюдений (с помощью систем сейсмического мониторинга). При этом большую роль играет накопление статистики сейсмоэнерговыведения с привязкой гипоцентров сейсмических событий к шахтному полю [4].

Однако в ряде случаев динамические явления в угольных шахтах происходят в период «затишья» в местах временного отсутствия сейсмической активности. В таких случаях информацию о механическом состоянии массива горных пород могут дать непрерывные записи фоновых колебаний сейсмических датчиков [5, 6].

В статье предложен новый инструмент анализа длительных записей, главным источником полезной информации которого являются «фоновые колебания». В распоряжении авторов имелись непрерывные записи пяти датчиков системы сейсмического мониторинга «GITS» (разработана и произведена в АО «ВНИМИ») за период с 01.06.2024 по 01.12.2024.

В статьях [5, 6] описан процесс организации непрерывных наблюдений и получения данных, а также анализ суточных записей с помощью специальной «сканирующей» функции, отслеживающей долю суммарной амплитуды колебаний выделенного частотного диапазона в полном спектре.

Авторы данной статьи применили новый метод для анализа непрерывных суточных записей с использованием полной энергии колебаний, которая представляет собой суммирование энергий компонент X , Y , Z сейсмического датчика. Энергия колебаний каждой компоненты рассчитывалась каждые 2 сек как площадь под графиком энергетического спектра для всего частотного диапазона для отрывка записи длительностью 4 сек.

Обработка данных

Непрерывная суточная запись с сохранением данных в память регистрирующего компьютера организована сотрудниками АО «ВНИМИ» (г. Санкт-Петербург) в 2024 г. для нескольких сейсмических датчиков, распределенных по шахтному полю Таштагольского железорудного месторождения.

Датчик системы «GITS» представляет собой трехкомпонентный акселерометр, позволяющий вести регистрацию колебаний в диапазоне частот 0,5 – 1000 Гц с возможностью выбирать более узкий диапазон [7]. Частота дискретизации регистрируемого сигнала составляет 2 кГц. Частота сохраняемого в память компьютера сигнала в режиме непрерывной записи – 500 Гц.

В условиях Таштагольского железорудного месторождения датчики системы установлены в специальных нишах на бетонных постаментах (рис. 1), сориентированы по сторонам света – компонента X на восток, Y на север, Z – вертикально вверх.

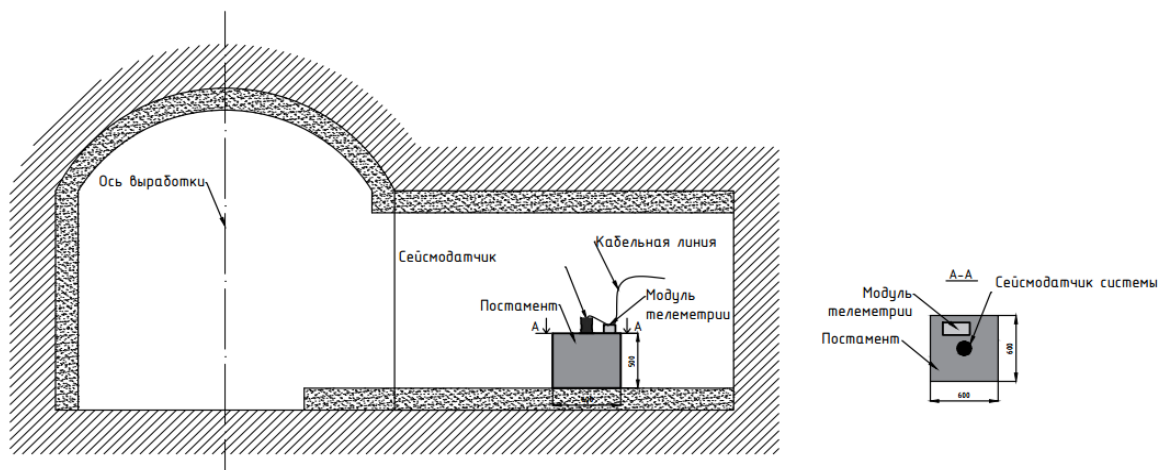


Рис. 1. Схема установки датчика

Для демонстрации изменения полной энергии в течение суток приводится запись датчика № 25 системы сейсмического мониторинга «GITS», установленной на Таштагольской железорудной шахте.

Выбранный для анализа сейсмодатчик № 25 расположен наиболее близко к участкам ведения добычных работ и фактически находится в зоне перераспределения горного давления от образованных пустот породного массива [7].

24 июля 2024 г. в 13:47:42 (UTC±0:00) на Таштагольском железорудном месторождении был зарегистрирован крупнейший за последние несколько лет сейсмический толчок, энергия которого превысила 1 ГДж. Сразу за толчком последовало резкое увеличение сейсмической активности.

На рис. 2 показан участок шахтного поля Таштагольского железорудного месторождения с отметками сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024 и отметкой расположения датчика № 25.

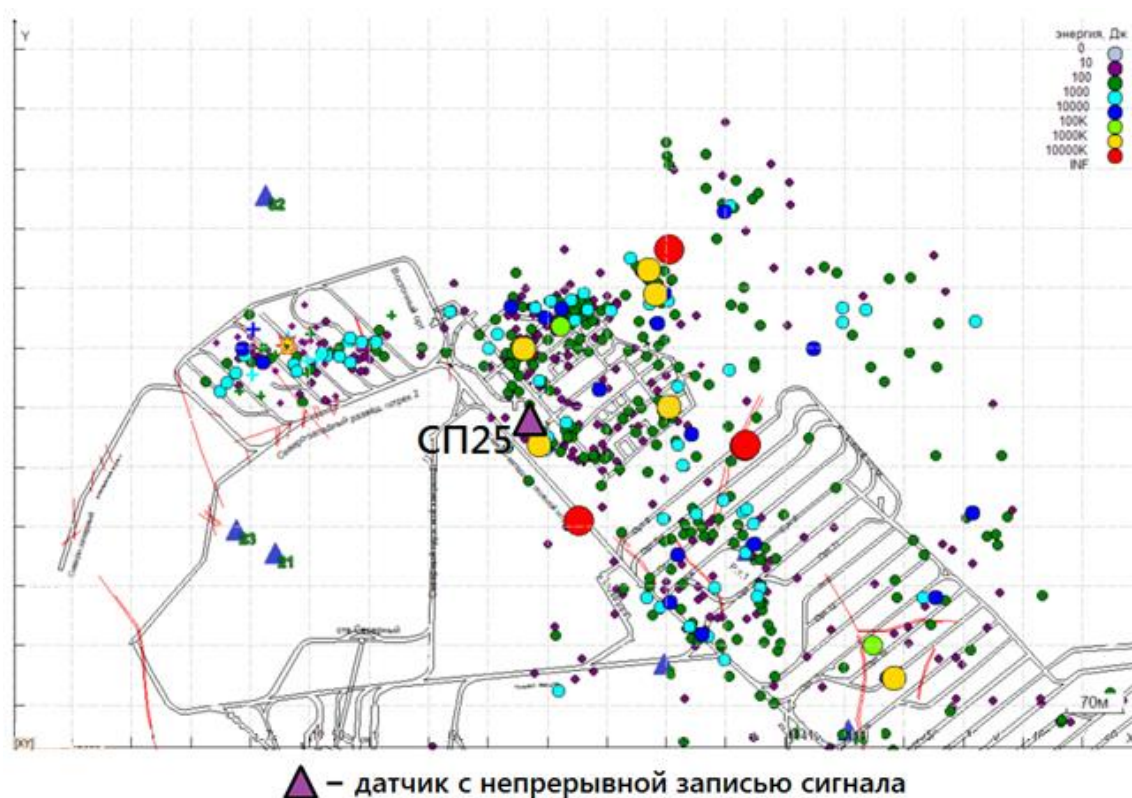


Рис. 2. Карта гипоцентров сейсмических событий в окрестности датчика № 25 системы «GITS» на Таштагольском железорудном месторождении

Все крупные толчки (красные и желтые кружки) и большая часть мелких событий произошли во второй половине суток, после регистрации крупнейшего толчка с энергией порядка 1 ГДж.

Для представления о характере сейсмической активности в течение суток, до и после крупнейшего толчка, приводится график энергии всех сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024 (рис. 3).

В начале суток, в 0:30, был произведен технологический взрыв, после которого последовал короткий всплеск сейсмической активности в низкоэнергетическом диапазоне. Далее, в первой половине суток, наблюдается средняя интенсивность сейсмической активности. Отчетливо виден резкий всплеск сейсмической активности после сейсмического толчка с энергией 1 ГДж в 13:47:42. Таким образом, выбранные сутки характеризуются наличием как периода «затишья», так и периода аномально высокой активности и представляют интерес для анализа непрерывной записи.

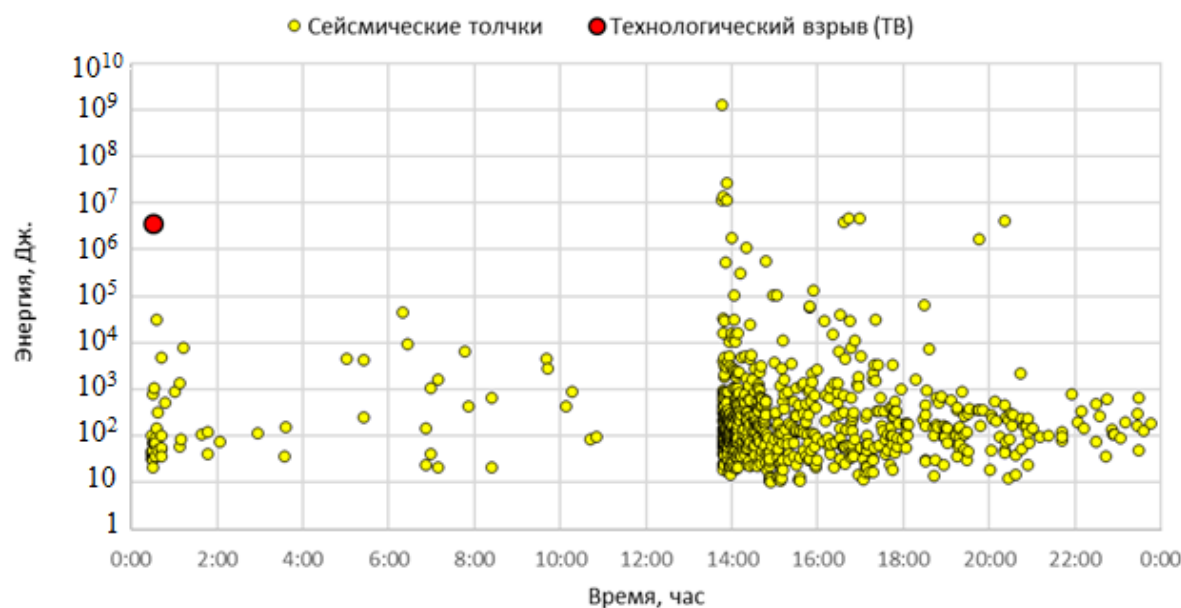


Рис. 3. График энергии сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024

На рис. 4 представлены суточные сейсмограммы сейсмического датчика № 25, расположенного в зоне повышенной сейсмической активности шахтного поля Таштагольского железорудного месторождения.

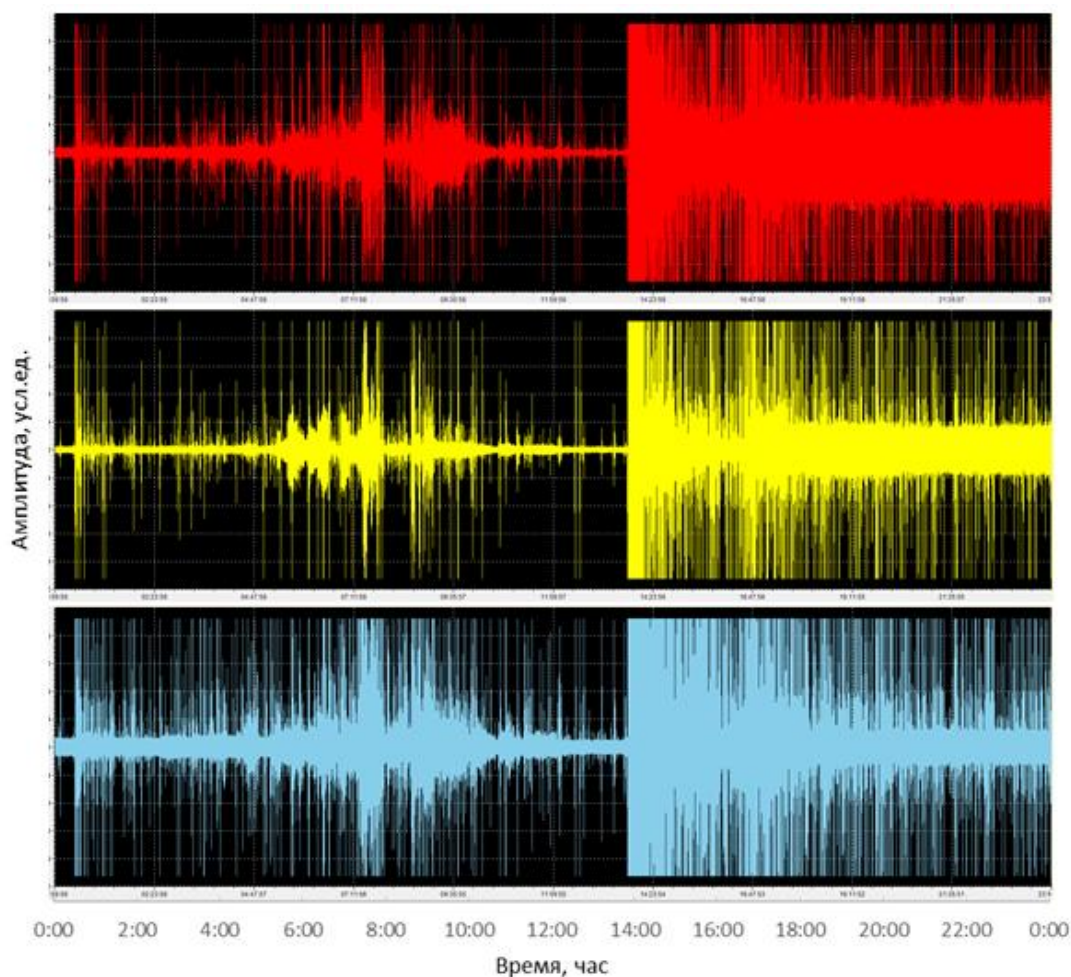


Рис. 4. Сейсмограммы непрерывной суточной записи датчика № 25

Сейсмический толчок с энергией 1ГДж в 13:47:42 и последующий за ним всплеск активности отчетливо видны на сейсмограммах. Для всех трех компонент датчика 25 были рассчитаны графики полной энергии колебаний (рис. 5).

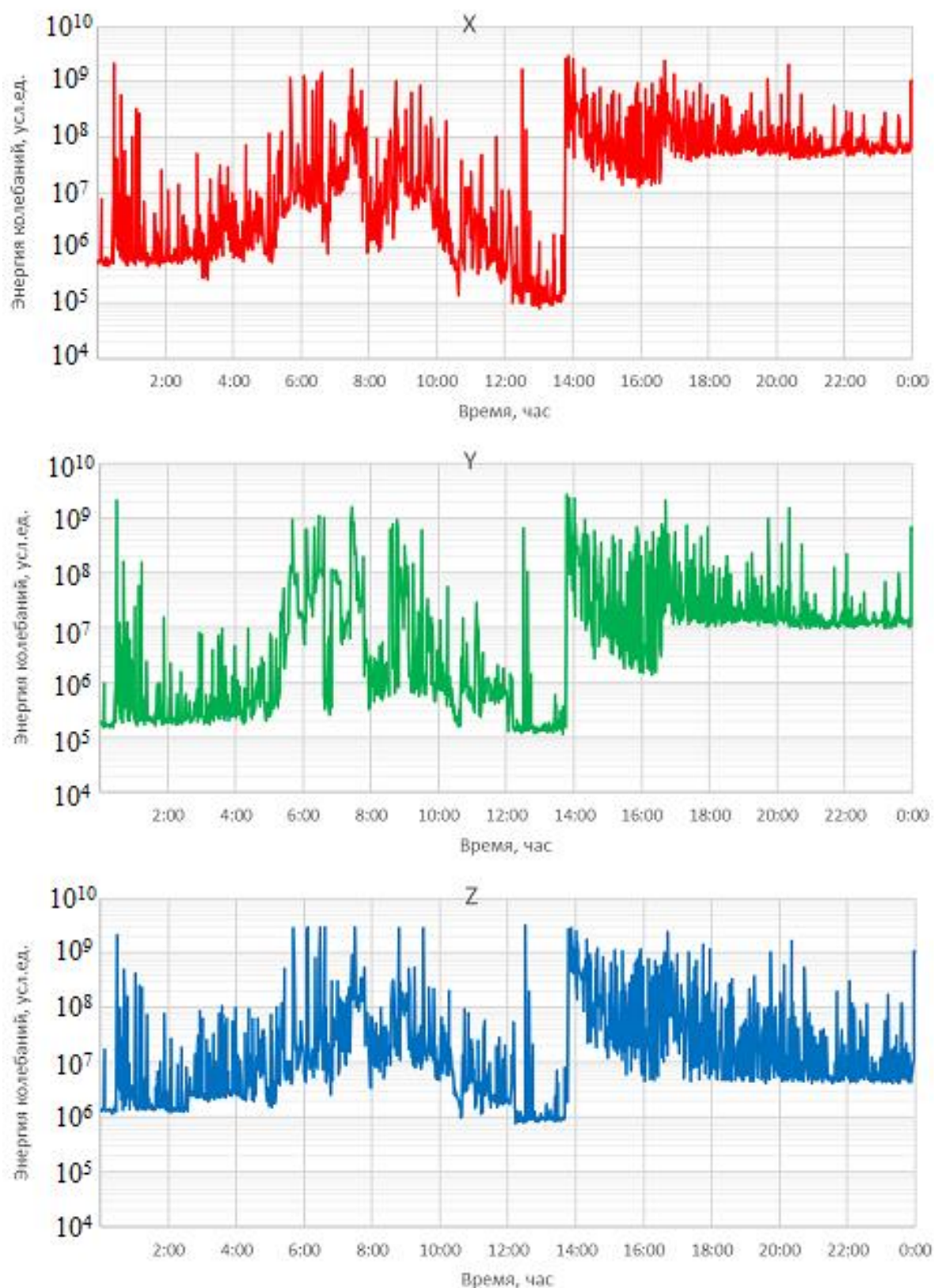


Рис. 5. Графики полной энергии колебаний компонент XYZ датчика № 25 системы «GITS» в течение 24.07.2024

Суточные графики полной энергии колебаний для компонент XYZ датчика № 25 показывают существование «фоновый» уровня энергии. Этот уровень хорошо прослеживается на графике с логарифмическим масштабом вертикальной шкалы (см. рис. 5) в начале суток (с 0:00 до 2:00 UTC±0:00) и в середине суток (с 12:00 до 14:00 UTC±0:00). В это время происходит перерыв между рабочими сменами, интенсивность горных работ снижается, что позволяет отметить фоновый уровень энергии колебаний датчика.

Из рис. 5 видно, что графики для каждой из трех компонент датчика неодинаковы. График компоненты X показывает следующее.

«Фоновый» уровень энергии колебаний датчика в начале суток, в промежутке 0:00 – 3:00, составил порядка $5 \cdot 10^5$ усл. ед. Технологический взрыв в 0:30 отражен в графике резким скачком до значений $1 \cdot 10^9$, но продолжительность повышенных значений невелика, и график возвращается к фоновому уровню.

В первой половине суток рост полной энергии колебаний обусловлен интенсивными горными работами в окрестности датчика. Между рабочими сменами (с 12:00 до 14:00 UTC±0:00) уровень полной энергии падает до значений заметно ниже фоновых, до $1 \cdot 10^5$. Однако вторая рабочая смена в этот день не смогла приступить к работе: в 13:47:42 крупнейший сейсмический толчок привел к массовым деформациям выработок и остановке рабочего процесса. Все подземные рабочие были выведены на поверхность. В любой спокойный сейсмический день при остановке работ уровень полной энергии остался бы на фоновых значениях. Но произошедший удар резко поднял уровень полной энергии колебаний до максимальных значений за сутки – $2 \cdot 10^9$ усл. ед. Примечательно, что после удара и до 16:30 значения графика постепенно снижаются, но не падают ниже $1 \cdot 10^7$ усл. ед. Следующий по энергии крупный толчок в 16:34 опять поднимает уровень полной энергии, который впоследствии уже не падает ниже значений в $5 \cdot 10^7$ усл. ед.

Таким образом, мы наблюдаем изменение «фоновый» значения полной энергии колебаний датчика после каждого особо крупного толчка, произошедшего в окрестности датчика. Это обстоятельство вносит существенные коррективы в представления о механике породных массивов, в особенности о колебательных процессах в породных массивах блочного строения [8 – 10].

Группы упругих волн от сейсмических событий и технологических взрывов средней и низкой силы, проходящие через датчик, приводят к резкому росту полной энергии колебаний, однако после затухания группы упругих волн, когда датчик возвращается в состояние фоновых колебаний, полная энергия колебаний также падает до уровня фоновых значений. Но крупнейший сейсмический толчок, горный удар, произошедший в окрестности датчика, привел к изменению уровня фоновых колебаний более чем на два порядка вверх.

Данные наблюдения вынуждают задаться вопросом, от чего зависит полная энергия колебаний датчика и в особенности ее «фоновый» уровень.

Представленные графики имеет смысл рассматривать как по отдельности для каждой компоненты, так и в сумме для всего датчика (рис. 6).

Суммарный график принимает смысл «геомеханической температуры» для участка массива горных пород, в котором установлен датчик. Графики для каждой из компонент будут характеризовать анизотропию волнового поля в области датчика, а с позиций механики блочной среды – различие в степени «зажатости» блока породного массива, в котором установлен датчик [11].

Не менее интересную информацию о колебательном состоянии породного массива показывают графики процентного отношения энергии колебаний каждой компоненты от суммарной полной энергии колебаний датчика.

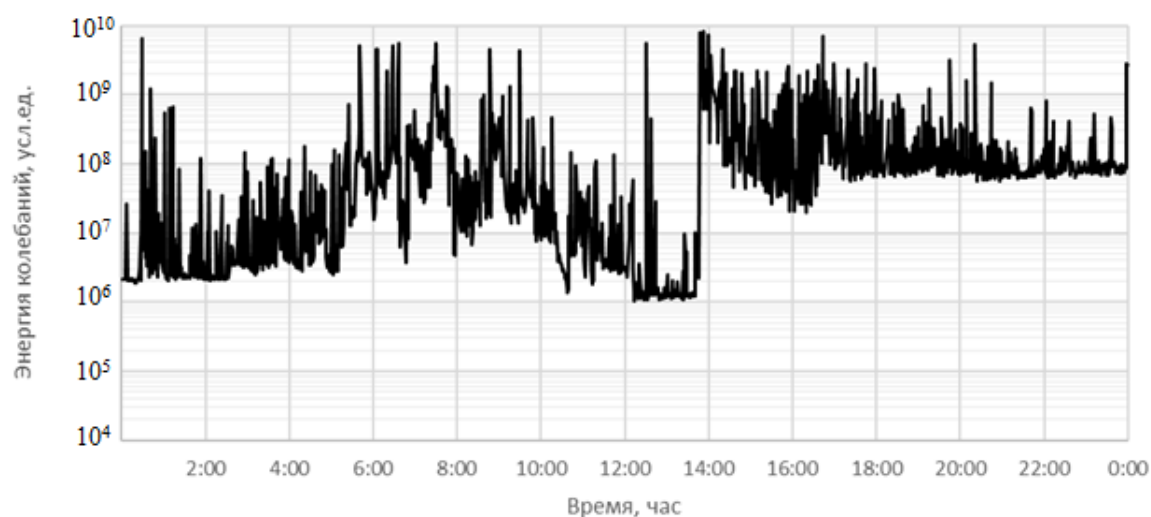


Рис. 6. Суммарный график полной энергии колебаний датчика №25 24.07.2024

Подобные графики для суточной записи датчика № 25 24.07.2024 представлены на рис. 7 и в логарифмическом масштабе вертикальной шкалы на рис. 8.

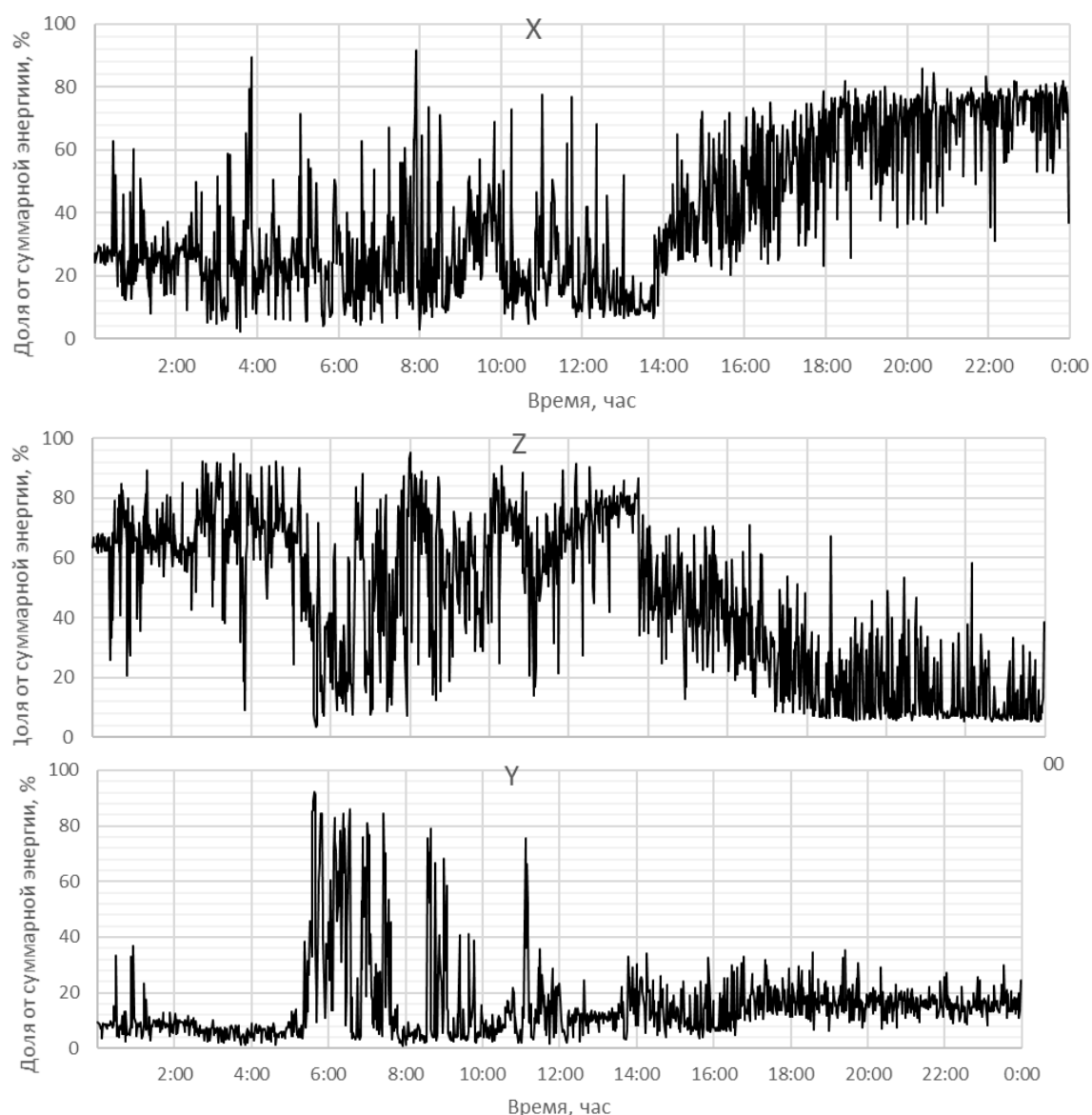


Рис. 7. Графики процентного отношения энергии колебаний каждой из компонент XYZ от полной энергии колебаний всего датчика

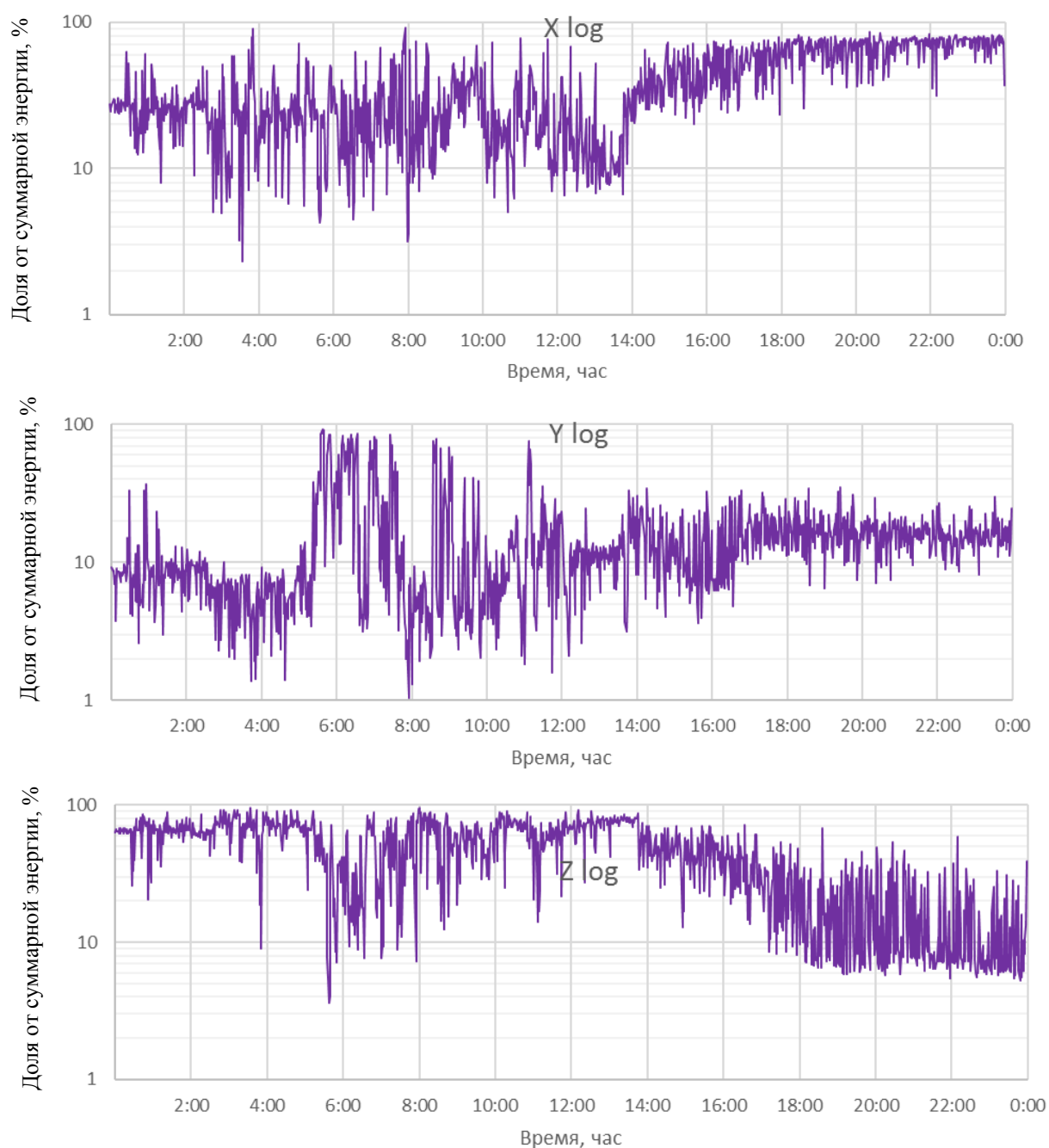


Рис. 8. Графики процентного отношения энергии колебаний каждой из компонент XYZ от полной энергии колебаний всего датчика (в логарифмическом масштабе по вертикальной оси)

Полученные графики позволяют проследить смещение энергии колебаний между направлениями XYZ. Появление крупных сейсмических событий вблизи выбранного датчика сопровождается изменением распределения энергии колебаний между компонентами датчика.

Представление массива горных пород в виде блочной среды с многоуровневой иерархической структурой позволяет интерпретировать переход энергии колебаний между компонентами одного датчика как появление новых степеней свободы (и в новых направлениях) блока породного массива, в котором установлен датчик [12]. Также возможна связь обнаруженных эффектов с изменением направления действия главных напряжений в массиве горных пород.

Выводы

Таким образом, отслеживание фоновых колебаний сейсмических датчиков может стать инструментом прогноза горных ударов и внезапных выбросов угля и газа при ведении горных работ на больших глубинах. Авторами предложен новый метод получения и обработки качественно нового типа данных о колебательных процессах, протекающих в породном массиве в процессе ведения горных работ на большой глубине. Рассмотрена непрерывная суточная запись датчика, в непосредственной близости от которого произошел крупнейший за год сейсмический толчок с энергией порядка 1 ГДж. Последовавший за этим рост сейсмической активности нашел отражение в энергетических характеристиках суточной записи датчика.

Получены суточные графики изменения полной энергии колебаний для каждой из компонент сейсмического датчика. Введено понятие «фоновый уровень полной энергии колебаний». Установлено, что фоновый уровень полной энергии колебаний сейсмического датчика непостоянен и может изменяться в течение суток, в том числе скачкообразно после появления крупных сейсмических событий вблизи датчика. За два часа до регистрации толчка с энергией 1 ГДж фоновый уровень полной энергии падает до минимальных значений.

Вместе с этим обнаружено, что распределение полной энергии колебаний датчика по трем компонентам неравномерно. На это распределение также влияют крупные сейсмические события вблизи датчика.

Предложенный метод анализа сейсмической информации может иметь развитие для установления связи суточных показателей энергии колебаний датчика с газодинамическими явлениями в угольных шахтах и рудниках [13, 14].

Список литературы

1. Еременко А.А., Еременко В.А., Лобанова Т.В., 2023. *Указания по безопасному ведению горных работ на Таштагольском месторождении, опасном по горным ударам*. Новосибирск-Новокузнецк, 76 с.
2. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н., 2016. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 34-47.
3. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г., 2019. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*, Т. 2019, № 9, С. 68-72.
4. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А., 2022. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, С. 12–22.
5. Рукавишников Г.Д., Мулев С.Н., Гаврилов А.Г., 2023. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга GITS на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*, №S1, С. 90-95. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>
6. Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д., 2024. Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*, № S3, С. 32-36. DOI 10.30686/1609-9192-2024-S3-32-36
7. Штирц В.А., Колтышев В.Н., 2015. Обработка блоков и распределение толчков после массовых взрывов в условиях Таштагольского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 54-59.
8. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А., 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии.

Часть I: формулировка и обоснование задачи исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 1, С. 5-25.

9. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть II: динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмодиссипационные процессы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 5-26.

10. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А., 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть III: перспективные системы контроля деформационноволновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 5-29.

11. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И., 1997. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, С. 3-16.

12. Адушкин В.В., Опарин В.Н., 2014. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 10-38.

13. Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A. et al., 2018. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass. *J. of Mining Sci.*, Vol. 54, No. 1, P. 3 – 14.

14. Киряева Т.А., Рукавишников Г.Д., 2021. О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, № 2, С. 385-395.

References

1. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Lobanova T.V., 2023. Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na Tashtagol'skom mestorozhdenii, opasnom po gornym udaram [Guidelines for the safe conduct of mining operations at the Tashtagol deposit, dangerous for rock bursts]. Novosibirsk-Novokuznetsk, 76 p.

2. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Mulev S.N., 2016. Zakonomernosti razvitiya i metodika operativnoi otsenki tekhnogennoi seismicheskoi aktivnosti na gornykh predpriyatiyakh i v gornodobyvayushchikh regionakh [Patterns of development and methods of operational assessment of man-made seismic activity at mining enterprises and in mining regions]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2, P. 34-47.

3. Mulev S.N., Pital' M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G., 2019. Sovremennye tekhnologii seismicheskogo monitoringa ugol'nykh shakht i rudnikov [Modern technologies for seismic monitoring of coal mines and pits]. *Gornyi zhurnal*, Vol. 2019, № 9, P. 68-72.

4. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A., 2022. Monitoring geodinamicheskikh yavlenii mikroiseimicheskim metodom pri osvoenii udaroopasnykh mestorozhdenii [Monitoring of geodynamic phenomena by the microseismic method in the development of rock burst-hazardous deposits]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 1, P. 12-22.

5. Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrilov A.G., 2023. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya sistemy seismicheskogo monitoringa GITS na Tashtagol'skom zhelezorudnom mestorozhdenii [Experience in the application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagol iron ore deposit]. *Gornaya promyshlennost'*, № S1, P. 90-95. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>

6. Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Rukavishnikov G.D., 2024. Sovremennye podkhody kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod po dannym seismicheskikh nablyudenii na Tashtagol'skom zhelezorudnom mestorozhdenii [Modern ap-

proaches to monitoring the stress-strain state of rock mass based on seismic observations at the Tashtagol iron ore deposit]. *Gornaya promyshlennost'*, № S3, P. 32-36. DOI 10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36

7. Shtirts V.A., Koltyshev V.N., 2015. Otrabotka blokov i raspredelenie tolchkov posle massovykh vzryvov v usloviyakh Tashtagol'skogo mestorozhdeniya [Block mining and shock distribution after mass blasts at the Tashtagol deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 7, P. 54-59.

8. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A., 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part I: formulation and justification of the research problem]. *Chast' I: formulirovka i obosnovanie zadachi issledovaniy*. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 1, P. 5-25.

9. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii. *Chast' II: dinamiko-kinematicheskie kharakteristiki voln mayatnikovogo tipa v napryazhennykh geosredakh i seismoemissionnye protsessy* [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part II: dynamic and kinematic characteristics of pendulum-type waves in stressed geomedia and seismic emission processes]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 5-26.

10. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Iushkin V.F., Kiryaeva T.A., 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii. *Chast' III: perspektivnye sistemy kontrolya deformatsionnovolnovykh protsessov v podzemnykh i nazemnykh usloviyakh vedeniya gornykh rabot* [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part III: promising systems for monitoring deformation-wave processes in underground and surface mining conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 12, P. 5-29.

11. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I., 1997. Ob effekte anomal'no nizkogo treniya v blochnykh sredakh [On the effect of abnormally low friction in block media]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 1, P. 3-16.

12. Adushkin V.V., Oparin V.N., 2014. Ot yavleniya znakoperemennoi reaktsii gornykh porod na dinamicheskie vozdеistviya – k volnam mayatnikovogo tipa v napryazhennykh geosredakh [From the phenomenon of alternating response of rocks on dynamic impacts to pendulum-type waves in stressed geo-environments]. *Ch. III. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 4, P. 10-38.

13. Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A. et al., 2018. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass. *J. of Mining Sci.*, Vol. 54, No. 1, P. 3 – 14.

14. Kiryaeva T.A., Rukavishnikov G.D., 2021. O vliyaniy zemletryaseni i moshchnykh tekhnologicheskikh vzryvov na gazodinamicheskuyu aktivnost' ugol'nykh shakht [About the influence of earthquakes and powerful technological explosions on the gas-dynamic activity of coal mines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, № 2, P. 385-395.