

0+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC, TECHNOLOGICAL AND PRODUCTION JOURNAL

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 25, № 5 Сентябрь–Октябрь 2025 г.
Vol. 25, № 5 September–October 2025

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru



Международная конференция «Плаксинские чтения – 2025»

1900
1967

125 лет члену-корреспонденту
АН СССР И. Н. Плаксину –
выдающемуся ученому
в области обогащения
полезных ископаемых
и металлургии

ПРИЕМНИК ПТ-24

- GPS-выноска подземных трасс с последующим наложением на карту;
- встроенный GPS/ГЛОНАСС модуль;
- высокоточное позиционирование (до 1 см.) совместно с RTK-планшетом PrinCe LT700H;
- использование смартфона вместо внешнего GPS-трекера.

GPS

ФУНКЦИЯ «КОМПАС» С РЕЖИМОМ «ВТОРАЯ ЛИНИЯ»

Одновременное схематическое отображение на дисплее искомой коммуникации и трассы с протекающим током 50, 100 или 300 Гц.

- Время работы – до 20 часов;
- увеличенный, сверхяркий цветной дисплей;
- диапазон рабочих температур: от -30 до +55 °С.



ГЕНЕРАТОР ГТ-80

- Мощность и ток до 80 Вт, 12 А;
- фиксированные частоты генератора: 273, 526, 1024, 8928, 32768 Гц;
- выбор произвольной частоты от 300 до 10000 Гц для работы с приемниками других производителей;
- дистанционное управление генератором через сеть GSM;
- отложенный старт;
- встроенный индуктор обеспечивает наведение сигнала 33 кГц в линию с поверхности земли;
- бесконтактная подача сигнала при помощи передающих клещей КИ-50 или КИ-100;
- встроенный аккумулятор;
- совместим со всеми приемниками серии «Сталкер».

ГЕНЕРАТОР ГТ-15

- Мощность 10 Вт;
- встроенный индуктор для бесконтактной подачи сигнала в коммуникацию.

Локализация и диагностика
подземных коммуникаций



на правах рекламы



РАДИО-СЕРВИС

426000, г. Ижевск, а/я 10047, ул. Пушкинская, 268, тел.: (3412) 43-91-44
факс: (3412) 43-92-63, e-mail: office@radio-service.ru, www.radio-service.ru

**У СДЕЛАНО
В РОССИИ**

Научно-внедренческая компания ГОРГЕОМЕХ



ООО Научно-внедренческая
компания «Горная геомеханика»
Москва, Варшавское ш., д.129 кор.2
+7 495 315 17 38
info@gorgeomeh.ru
www.gorgeomeh.ru



- ✓ **МАРКШЕЙДЕРСКИЕ РАБОТЫ**
- ✓ **ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**
- ✓ **ГЕОМОНИТОРИНГ**
- ✓ **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ**
- ✓ **ОБСЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СООРУЖЕНИЙ**
- ✓ **ГОРНЫЙ АУДИТ**
- ✓ **НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ**
- ✓ **РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**
- ✓ **ПРОЧИЕ РАБОТЫ**

**Более 12 - ти лет
на ниве геомеханики**

2079 3332
3034 683

Научно-технический и производственный журнал



Т. 25, № 5
Сентябрь–Октябрь 2025 г.

Журнал издается с 2001 года



УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Общество с ограниченной
ответственностью «Издательский дом
«Недропользование и горные науки»

РЕДАКЦИЯ:

Заместитель главного редактора **В. Н. Хетагуров**
Ведущий редактор **Н. А. Федотенко**
Ученый секретарь **Н. А. Милетенко**
Помощник главного редактора **Б. Н. Пашичев**

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ:

117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.
Тел.: +7(915) 111 0386

E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru http://www.n-gn.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций. Регистрационный номер ПИ № ФС 77-83630
от 26.07.2022 г.

По решению ВАК журнал включен в Перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий, в которых
могут быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата и
доктора наук по разработке месторождений полезных
ископаемых и по наукам о Земле

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных
ВИНИТИ и в Российский индекс научного цитирования.
Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной
справочной системе по периодическим и продолжающимся
изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Подписной индекс издания в каталоге «Урал-Пресс»,
в объединенном каталоге АРЗИ «Пресса России» – **88016**

В течение года можно произвести подписку на журнал
непосредственно в редакции

За точность приведенных сведений
и содержание данных, не подлежащих открытой публикации,
несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал

«Маркшейдерия и недропользование» обязательна

Журнал отпечатан в типографии ООО «Клуб печати»
127018, Москва, 3-ий проезд Марьиной Рощи, д. 40, стр. 1

тел.: +7(929)982-72-82

Тираж 1000 экз.

Свободная цена.

Дата выхода в свет: 01.11.2025

ISSN 2079-3332



24 003



© ООО «Издательский дом «Недропользование
и горные науки», 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ю. В. Дмитрак – д.т.н., проф., зав. отделом «Моделирование и управление горнотехническими
системами», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. А. Барях – академик РАН, д.т.н., проф., руководитель научного направления «Горные
науки» центра, ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь, РФ

В. И. Голик – д.т.н., проф., проф. кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»,
г. Владикавказ, РФ

В. В. Грицков – вице-президент ООО «Союз маркшейдеров России», г. Москва, РФ

В. Н. Захаров – академик РАН, д.т.н., проф., директор, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Д. Р. Каплунов – член-корр. РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Теория
проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Н. М. Качурин – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Геотехнологии и строительство подземных
сооружений», ТулГУ, г. Тула, РФ

Р. В. Ключев – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных
предприятий», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ, РФ

Н. В. Милетенко – д.г.-м.н., проф., ученый секретарь Научно-технического совета,
Минприроды РФ, г. Москва, РФ

И. А. Пыталев – д.т.н., проф., директор Института горного дела и транспорта, МГТУ им.
Г.И. Носова, г. Магнитогорск, РФ

К. Н. Трубецкой – академик РАН, д.т.н., проф., советник президиума РАН, ИПКОН РАН,
г. Москва, РФ

М. А. Тюленев – к.т.н., доц., зав. кафедрой «Открытые горные работы», КузГТУ,
г. Кемерово, РФ

В. А. Чантурия – академик РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Проблемы
комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного
сырья», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДКОЛЛЕГИЯ

С. Б. Вуйич – проф., доктор наук, действительный член Академии инженерных наук Сербии,
г. Белград, Сербия

И. Гобани – д.т.н., проф. химии материалов и биогидрометаллургии, Факультет
естественных наук, Колледж здравоохранения и естественных наук, Линкольнский
университет, Великобритания

К. Дребенштедт – проф., доктор наук, кафедра «Открытые горные работы», Технический
университет Горной академии Фрайберга, Германия

Ю. Д. Каплунов – проф., д.физ.-мат.н., Школа компьютерных наук и математики, Кильский
университет, г. Ньюкасл-андер-Лайм, Великобритания

А. А. Осокин – доктор наук, Инженер-геотехник, рудник «Золотая роща», 29Metals, Западная
Австралия

Н. Б. Рысанов – д.т.н., Президент Национальной Академии Горных Наук Казахстана,
Президент Горнопромышленного союза Казахстана, Казахстан

Л. Хуанг – проф., доктор наук, Китайский университет горного дела и технологий,
Председатель Международного общества маркшейдеров, Китай

В. Т. Хунг – проф., доктор наук, строительный факультет, кафедра «Подземного и шахтного
строительства», Ханойский горно-геологический университет, Вьетнам

М. Цехлар – д.т.н., проф., декан, факультет горного дела, экологии, управления
технологическими процессами и геотехнологий, Технический университет Кошице,
Словакия

И. К. Чулуев – к.т.н., Президент Кыргызской горной ассоциации и маркшейдерии, член
Правления Евразийского Общества Экспертов Недропользователей, КГТУ им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан

Б. Эрбаш – проф., доктор наук, кафедра математики, Эскишехирский технический
университет, Турция

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

И. И. Айбиндер – д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Теория проектирования и геотехнологии
комплексного освоения недр», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Добрынин – к.т.н., в.н.с., отдел «Проблемы геомеханики и разрушения горных пород»,
ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Г. В. Калабин – д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Горная экология», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

С. Б. Кулибаба – д.т.н., проф., в.н.с., лаборатория «Многофазных процессов в массивах
горных пород при разработке месторождений», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Ф. К. Низаметдинов – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия»,
КарТУ имени Абылкаса Сагитова, г. Караганда, Республика Казахстан

М. Б. Носырев – д.т.н., проф., кафедра «Информатики», Уральский государственный
горный университет, г. Екатеринбург, РФ

В. Н. Одинцев – д.т.н., в.н.с., центр проблем метана и газодинамических явлений угольных
и рудных месторождений, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Хорешок – д.т.н., проф., научный руководитель Горного института, КузГТУ, г.
Кемерово, РФ

Ю. Ян – доц., Школа наук об окружающей среде и пространственной информатики,
Китайский горно-технологический университет, г. Сюйчжоу, Китай

2079 3332
3034 683

Scientific, Technological and Production Journal



Vol. 25, № 5
September–October 2025

journal has been published since 2001



FOUNDER OF THE JOURNAL
**PUBLISHING HOUSE MINERALS
MANAGEMENT AND MINING SCIENCES,
LIMITED LIABILITY COMPANY**

EDITORIAL OFFICE:

Deputy Editor-in-Chief **V. N. Khetagurov**
Lead Editor **N. A. Fedotenko**
Scientific secretary **N. A. Miletenko**
Assistant Editor-in-Chief **B. N. Pashichev**

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE AND PUBLISHER:

117647, Akademika Kapitsa st., 26, 1.
Phone: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
<http://www.n-gn.ru>

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Registration certificate PI No. FS 77-83630 dated
July 26, 2022

By decision of the Higher Attestation Commission, the journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results can be published dissertations for the degree of candidate and doctor of science in the development mineral deposits and geosciences

The journal is included in the Abstract Journal and Databases of VINITI and in the Russian science citation index Information about the journal is published annually in the international reference system in the periodicals and continuing editions of Ulrich's Periodicals Directory

Subscription index of the publication in the Ural-Press catalog, in the unified catalog ARZI «Press of Russia» – **88016**

During the year, you can subscribe to the journal directly in the editorial office

For the accuracy of the information provided and the content of data not subject to open publications are the responsibility of the authors

When reprinting a link to the journal
«Mine Surveying and Subsurface Use» required
Printed by LLC «Printing Club»

127018, Moscow
phone: +7(929)982-72-82
Covering - 1000 copies.
Free price.

Release date: 01.11.2025

ISSN 2079-3332



24 003



© Publishing House Minerals Management and Mining Sciences, LLC, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

Yuri V. Dmitrak - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Modeling and Management Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Alexander A. Baryakh - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the scientific direction Mining Sciences of the center, Mining Institute, Ural Branch, RAS, Perm, Russian Federation

Vladimir I. Golik - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Mining Department, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Victor V. Gritskov - Vice-President of the Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation

Valery N. Zakharov - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

David R. Kaplunov - Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Nikolay M. Kachurin - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Geotechnologies and Construction of Underground Structures, Tula State University, Tula, Russian Federation

Roman V. Klyuev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department Power Supply of Industrial Enterprises, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Nikolay V. Miletenko - Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Prof., Scientific Secretary of the Scientific and Technical Council, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Ivan A. Pytalev - Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Mining and Transport, Nosov Mamotogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Kliment N. Trubetskoy - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Advisor to the Presidium of the RAS, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Maxim A. Tylenov - Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Open-pit Mining, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Valentin A. Chanturia - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Problems of complex extraction of mineral components from natural and man-made raw materials, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Slobodan B. Vujčić - Professor, Dr. Sci., Full member of the Academy of Engineering Sciences of Serbia, Belgrade, Serbia

Yousef Ghorbani - Ph.D., Professor in Materials Chemistry and Bio-Hydrometallurgy, School of Natural Science, College of Health and Science, University of Lincoln, United Kingdom

Carsten Drebenstedt - Professor, Dr. Sci., Chair Surface Mining, Technical University Mining Academy Freiberg, Germany

Julius D. Kaplunov - Professor, Dr. Sci. in Theoretical Solid Mechanics, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, United Kingdom

Alexander A. Osokin - Dr. Sci., Geotechnical Engineer, Golden Grove, Operations Pty Ltd, 29Metals, Western Australia

Nurlan B. Ryspanov - Dr. Sci. (Eng.), President of the National Academy of Mining Sciences of Kazakhstan, President of the Kazakhstan Mining Union, Kazakhstan

Leting Huang - Professor, Dr. Sci., China University of Mining and Technology, Chair of the International Society for Mine Surveying, China

Vo Trong Hung - Professor, Dr. Sci., Faculty for Construction, Department for Underground and Mines Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

Michal Čechlar - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Dean, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies, Technical University of Kosice, Slovakia

Ishimbay K. Chunuev - PhD in Technical Sciences, President of the Kyrgyz Mining Association and Surveying, Member of the Board of the Eurasian Society of Experts of Subsoil Users, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyzstan

Baris Erbas - Professor, Dr. Sci., Department of Mathematics, Eskisehir Technical University, Turkey

EDITORIAL COUNCIL

Igor I. Alnbinder - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Alexander A. Dobrynin - Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Geomechanics and Rock Destruction, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Gennady V. Kalabin - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Mountain Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Sergey B. Kulibaba - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher Laboratory of Multiphase processes in rock formations during field development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Farit K. Nizametdinov - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Surveying and Geodesy, Abylbas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Mikhail B. Nosyrev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Computer Science, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

Vladimir N. Odintsev - Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher at the Center for Problems of Methane and Gas Dynamic Phenomena of Coal and Ore Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Alexey A. Khreshok - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Mining Institute, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Yongjun Yang - Ass. Professor, School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, China

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Поздравление редакции с Днем работников нефтяной и газовой промышленности	4	Congratulations from the editorial staff on Oil and Gas Industry Workers' Day
ИТОГИ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ		RESULTS OF SCIENTIFIC CONFERENCES
Решение Международной конференции «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья»	5	Resolution of the International Conference "Innovative Processes of Complex and Deep Processing of Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials"
ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ		MINERAL PROCESSING
<i>В. И. Голик, С. Г. Страданченко, Ю. В. Дмитрак, В. А. Масленников, Б. В. Дзеранов</i>		<i>V. I. Golik, S. G. Stradanchenko, Yu. V. Dmitrak, V. A. Maslennikov, B. V. Dzeranov</i>
Значимость независимых факторов для извлечения металлов в раствор выщелачивания	10	The importance of independent factors for extraction metals in the leaching solution
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ		GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES
<i>В. Е. Кисляков, А. В. Шварцкопф, А. С. Федотов</i>		<i>V. E. Kislyakov, A. V. Shwartzkopf, A. S. Fedotov</i>
Исследование влияния горно-геологических условий Бейского месторождения и режима горных работ на схему вскрытия и порядок отработки	15	Study of the influence of mining and geological conditions of the Beyskoye deposit and the mining mode on the opening scheme and the order of development
<i>А. А. Григорьев, А. М. Григорьев, А. В. Зинченко, К. Б. Пономаренко</i>		<i>A. A. Grigoryev, A. M. Grigoryev, A. V. Zinchenko, K. B. Ponomarenko</i>
Осесимметричная задача сдвижения массива линейно-деформируемых горных пород при подземной отработке	21	The axisymmetric problem of the displacement massif a linear-deformable rock mass during the underground mining
ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД		GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION
<i>В. Ф. Гутник, А. Н. Анушенков, С. А. Вахмин, Н. В. Пархоменко</i>		<i>V. F. Gutnik, A. N. Anushenkov, S. A. Vokhmin, N. V. Parkhomenko</i>
Повышение эффективности буровзрывных работ при проходке горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты	26	Increasing the efficiency of drilling and blasting operations in driving large cross-section mining in permafrost conditions
ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ		GEOLOGY, EXPLORATION, AND EXPLOITATION OF OIL AND GAS FIELDS
<i>А. Н. Кабиров, А. А. Вольф, Д. А. Рожнев</i>		<i>A. N. Kabirov, A. A. Wolf, D. A. Rozhnyov</i>
Применение сайклинг-процесса на газоконденсатных месторождениях Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором	39	Application of the cycling process at gas condensate fields in Western Siberia with high gas condensate factor
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ		MINERAL RESOURCES
<i>В. И. Голик</i>		<i>V. I. Golik</i>
Использование природных ресурсов юга России	44	Use of natural resources in the south of Russia
МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ		SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS
<i>В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина, Н. Е. Ломакина, Е. С. Семькин</i>		<i>V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko, I. Y. Garifulina, N. E. Lomakina, E. S. Semykin</i>
Геолого-структурный анализ месторождения Арылах (Магаданская область) и адаптация технологий добычи на современном этапе	49	Geological and structural analysis of the Arylyakh deposit (Magadan region) and adaptation of mining technologies at the current stage
<i>Б. Н. Бухтояров, О. Р. Старикова, А. А. Виноградова</i>		<i>B. N. Bukhtoyarov, O. R. Starikova, A. A. Vinogradova</i>
Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении	55	Correction of well azimuth in directional drilling
<i>В. С. Писарев</i>		<i>V. S. Pisarev</i>
Комплекс маркшейдерских работ при разработке золоторудного месторождения подземным способом	68	A complex of mining surveying works in the development of a gold deposit by underground method

Дорогие читатели, коллеги, уважаемые работники и ветераны нефтяной и газовой промышленности!

Редакция журнала сердечно поздравляет вас с профессиональным праздником – Днем работников нефтяной и газовой промышленности!

Этот день по праву является признанием важнейшего вклада, который вы вносите в развитие энергетической отрасли России. Наша страна занимает лидирующие позиции на мировом рынке углеводородов, и всё это – результат вашей ежедневной ответственной работы. Без вашего труда невозможно было бы поддержание стабильной работы энергетической системы, развитие новых технологий и эффективная эксплуатация нефтегазовых месторождений.

Добыча нефти и газа – это не просто отрасль экономики, это основа всего, на чем строится энергетическая безопасность страны, процветание множества регионов и благосостояние миллионов граждан. Ваша профессия требует высокой квалификации, мужества и ответственности, а также способности решать самые сложные задачи, часто в условиях высокой неопределенности и жестких вызовов. Вы – те, кто без усталости трудитесь на благо страны, кто обеспечивает стабильную работу ключевых отраслей экономики, от которой зависят все сферы жизни.

Сегодня мы благодарим геологов, буровиков, инженеров, проектировщиков, технологов, ученых отрасли и всех тех, кто связал жизнь с отечественным нефтегазовым комплексом и беззаветно предан избранному делу. Ваш труд по разработке и внедрению новых технологий в нефтегазовом секторе играет ключевую роль в рациональном освоении наших природных ресурсов. Ваша научная деятельность является основой для внедрения инновационных решений, повышения эффективности и экологической безопасности добычи углеводородов. Благодаря вашей работе нефтегазовый комплекс

России продолжает развиваться и укреплять свою позицию на международной арене.

На страницах нашего журнала регулярно публикуются актуальные исследования, статьи и аналитические материалы по научным специальностям 2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр», 2.8.4 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», посвященные ключевым вопросам развития нефтяной и газовой промышленности. Мы стремимся быть площадкой для обмена опытом между ведущими специалистами отрасли, учеными, содействовать распространению передовых идей и лучших решений. Особое внимание уделяется публикациям, направленным на внедрение инновационных технологий, повышение экологической и промышленной безопасности, эффективное использование ресурсов и цифровизацию производственных процессов. Мы гордимся тем, что материалы наших авторов находят практическое применение и способствуют профессиональному развитию специалистов, а также формированию стратегического взгляда на перспективы отрасли.

Отдельно хочется отметить ветеранов отрасли, чьими усилиями были заложены основы для успешной работы сегодняшнего ТЭК, а также для будущих поколений, которые будут работать в этой сфере.

Желаем вам крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и новых профессиональных достижений. Пусть ваш труд и дальше будет приносить не только гордость, но и осязаемые результаты на благо нашей страны!

С праздником вас, уважаемые коллеги!

Редакция журнала
«Маркшейдерия и недропользование»



РЕШЕНИЕ

Международной конференции «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» («Плаксинские чтения – 2025»)

Научный совет Российской академии наук по проблемам обогащения полезных ископаемых, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ФГБУН «ИПКО» РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ») провели Международную конференцию «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» («Плаксинские чтения – 2025»). Конференция проходила 29 сентября – 4 октября 2025 года в Екатеринбурге на базе ФГБОУ ВО «УГГУ».



Торжественное открытие конференции – вступительное слово председателя оргкомитета, академика РАН Валентина Алексеевича Чантурия

На конференции собрались представители академической и отраслевой науки и учебных организаций, крупных горнодобывающих компаний, активно решающих научные и производственные проблемы обогащения и переработки минерального и техно-

генного сырья, показывающие высокий уровень знаний и профессионального мастерства, поддерживающие неизменно высокий статус Международной конференции «Плаксинские чтения» в содружестве с зарубежными представителями.



Участники Международной конференции «Плаксинские чтения – 2025»



Главный редактор журнала «Маркшейдерия и недропользование», профессор, доктор технических наук Юрий Витальевич Дмитрак принял участие в работе конференции «Плаксинские чтения – 2025»

Названием «Плаксинские чтения» конференция, проводимая 49-й раз, отдает дань памяти Игорю Николаевичу Плаксину – члену-корреспонденту АН СССР, дважды лауреату Государственной премии СССР, основателю научной школы обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии редких, цветных и благородных металлов. Научное наследие, оставленное этим замечательным человеком, трудно переоценить. Его труды и сегодня имеют непрерываемую актуальность и значимость для ученых и практиков как в России, так и за рубежом.

Конференция также была приурочена к 280-летию открытия золотonosных месторождений России и первого обогатительного предприятия на Урале – ООО «Берёзовский рудник», действующего на месторождении золота, открытого в 1745 году Ерофеем Марковым.

В конференции участвовали 234 представителя из 81 организации, в том числе 22 академических и отраслевых института и 11 вузов, 7 крупных горно-обогатительных компаний. С докладами выступили и приняли участие в конференции ученые и практики Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана, Вьетнама. Было заслушано 122 доклада, в том числе 12 пленарных лекций и 110 докладов на 5 секциях, 45 докладов представлено молодыми учеными.

В работе пленарного заседания и секций конференции приняли участие: 2 действительных члена Российской академии наук, 32 доктора наук, 59 кандидатов наук.

Конференция «Плаксинские чтения – 2025» проводилась на базе ФГБОУ ВО «УГГУ» – полнопрофильного горного высшего учебного заведения, основанного в 1914 году. Кафедра обогащения полезных ископаемых, основанная в 1921 году профессором М. Ф. Ортиным, более ста лет обеспечивает подготовку горных инженеров-обогащателей для Российской Федерации, стран СНГ и зарубежных стран.

Тема конференции «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» отражает содержание задач, постав-

ленных временем перед наукой обогащения полезных ископаемых. Горно-обогатительные предприятия производят большое количество отходов, которые составляют добытое из недр, но не используемое минеральное сырье. По данным Свердловского областного кадастра отходов производства и потребления, в 2023 году из 157,9 млн т отходов 57,9 % размещены в отвалах, хвостохранилищах и прочих техногенных образованиях.

Горно-обогатительные предприятия Уральского региона наращивают темпы комплексного использования минерального сырья. Ученые УрО РАН, научно-исследовательских учреждений и вузов принимают активное участие в развитии процессов обогащения на Урале и в России.

Примером комплексной и глубокой переработки природного минерального сырья является обогатительная фабрика ООО «Берёзовский рудник». На фабрике использована возможность селективного разрушения золотосодержащей руды и выделения 35 % вмещающих пород в виде товарного щебня, что повысило производительность фабрики. Глубокая переработка золотосодержащей руды с использованием центробежных концентраторов и флотомашин обеспечивает сквозное извлечение золота 95,44 % при потерях золота с хвостами обогащения на уровне 0,02–0,03 г/т. Технологические растворы очищаются на установке обратного осмоса. Фабрика работает с опережающим ростом выручки над себестоимостью.

Другим примером комплексной переработки руд является работа ПАО «Ураласбест», обогащающего руду сухими методами, и при массовой доле основного минерала хризотил-асбеста 2,5 % в товарный продукт перерабатывается 51 % добытой руды. Из руды, кроме 8 групп концентратов асбеста, производят 20 фракций щебня, террасную доску, крупнозернистую посыпку, песок, минеральные и песчано-щебенистые смеси, теплоизоляционные плиты и гидропонный субстрат, существуют проекты производства металлического и оксида магния, сернокислого натрия, аморфного кремнезема, магнезиевого флюса, карналлита, бишофита, магнезийсилькатного пропанта и т. п. Диверсификация производства стала фундаментом экономической устойчивости и развития ПАО «Ураласбест».

Нетрадиционным минеральным сырьем являются шлаки, пыли, шламы, хвосты, сточные воды и отвалы, накопленные на Урале в количестве, дающем основание включать техногенное сырье в стратегическую минерально-сырьевую базу РФ. Основные направления экономически сбалансированного недропользования – это изменение подходов к складированию отходов, рециклинг, замкнутое водопользование. Это требует дополнительных предпроектных исследований и непрерывной и целенаправленной работы специалистов предприятия.

Нетрадиционное природное минеральное сырье дает развитие новым предприятиям. Ярчайшим событием на Урале стало освоение «Русской медной компанией» бедных руд медно-порфировых месторождений на новейших фабриках Михеевского и Томинского ГОКов. Глубокая переработка забалансовых запасов Гумешевского месторождения, включая минерализованные шахтные воды, способом подземного выщелачивания, также реализуемая РМК, существенно расширяет возможности использования рудничных вод действующих и затопленных горных предприятий.

Теоретические разработки представлены научными осно-

вами предварительного обогащения на основе информационных методов, являющихся универсальными методами сухого обогащения руд, позволяющими удалять разубоживающую породу, а также выделять сорта рудного материала, изменяющие конфигурацию технологических схем. Замена тяжелосредней сепарации на рентгенорадиометрическую обеспечила переход на экологичные сухие методы обогащения магнетитовых руд уникального месторождения в г. Сатка.

Новые технологические решения возможны на основе цифровых технологий и искусственного интеллекта, цифровых двойников и автоматизированного проектирования, что открывает перспективы оптимизации процессов переработки минерального сырья.

Представлена теория опробования руд и продуктов обогащения. Сформулированы принципы правильного опробования и аналитические формулы определения неопределенности опробования. Созданы установки высокочастотного опробования пульпы, руды и концентратов.

Отдельно затронута тема методологии выбора технологических решений по сепарации минерального сырья на основе цифровых технологий. В условиях современной геополитической нестабильности и санкционного давления остро стоит задача технологического суверенитета – снижения зависимости от импортных технологий и актуализации отечественных научных разработок в области цифровых технологий горно-перерабатывающего сектора. Именно поэтому цифровая трансформация, в том числе создание собственных программных продуктов и внедрение инновационных цифровых решений становится стратегическим приоритетом для развития отрасли.

Среди наиболее эффективных внедренных цифровых

инструментов выделены: имитационное моделирование, использование нейросетевых методов, применение технологий машинного зрения для автоматизации контроля процессов и мониторинга технологических параметров. Подчеркнуто, что в среднем внедрение цифровых технологий повышает качество концентратов (+1–2 %), увеличивает извлечение полезных компонентов (+1–3 %), снижает энергопотребление (на 5–10 %), расход реагентов (на 8–15 %) и время простоев оборудования (на 10–20 %).

Исследования и внедрение инновационных инструментов цифровизации критически важны для повышения эффективности, экологичности и экономической устойчивости производств в условиях усложнения состава сырья и роста требований к результатам.

Научно обоснованы и разработаны комбинированные инновационные процессы глубокой комплексной переработки сапонитсодержащих техногенных вод алмазодобывающих предприятий, обеспечивающие получение дополнительных товарных продуктов широкого спектра применения, прирост технико-экономических показателей и экологическую безопасность производства.

Впервые показана перспектива использования модифицированных сапонитов для получения высококачественных строительных материалов и сорбентов для извлечения редких, редкоземельных металлов и золота из продуктивных растворов выщелачивания эвдиалитовых и золотосодержащих концентратов и очистки сточных вод горных предприятий от токсичных веществ.

Технологические решения на основе технологической минералогии отличаются традиционностью – разделение руды или промежуточных продуктов на фракции по круп-



Экскурсия на предприятие ПАО «Ураласбест»

ности с последующим их обогащением по различным схемам или подобранной эффективной комбинации известных методов разделения: гравитационных, магнитных, флотационных, гидрохимических, в отдельных случаях с новыми технологическими решениями типа электрохимической (электрофоретической) технологии. Новые технологические решения связаны с развитием технологической минералогии, опирающейся на новейшие возможности аналитического оборудования. Только на основе высокоразрешающих физических и электронно-микроскопических методов анализа появляются возможности глубокого изучения редкометалльных руд и редкоземельных элементов в рудах черных, цветных, благородных металлов, углей и неметаллических полезных ископаемых, которые не рассматривались ранее как новое нетрадиционное минеральное сырье.

Практически все пленарные лекции раскрывают инновационность решений, предлагаемых современной наукой, что является основой дальнейшего тесного сотрудничества ученых и специалистов горно-обогатительных предприятий.

Отмечается актуальность решаемых научных задач, междисциплинарный подход, применяемый в современных исследованиях, важность и высокая практическая значимость получаемых научных результатов, стабильный рост активного участия в научно-исследовательских работах молодых ученых.

В рамках работы секции академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института металлургии УрО РАН, профессор Андрей Андреевич Ремпель в торжественной обстановке открыл аудиторию имени академика РАН Н. А. Ватолина, в 1973–2018 годах преподававшего на кафедре химии в УГТУ.

Конференцией отмечается важность результатов научно-исследовательских работ, представленных в докладах. Практические результаты и предлагаемые технологии представляют несомненный интерес и будут востребованы.

Большая часть докладов была представлена молодыми учеными, что подтверждает преемственность и высокий уровень научных школ в области обогащения полезных ископаемых.

В рамках конференции на каждой из секций проведен конкурс на лучший доклад среди молодых ученых. Конкурсная комиссия выделила 10 научно-исследовательских работ молодых ученых и аспирантов, в которых представлены наиболее интересные теоретические и экспериментальные результаты в области переработки минерального сырья. Победители награждены дипломами и памятными подарками, дипломантам вручены денежные премии.

По содержанию работа конференции является отражением задач, решение которых предусмотрено утвержденной Правительством России «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года» (распоряжение № 1838-р от 11 июля 2024 года), направленных на устойчивое долгосрочное обеспечение национальной экономики минеральным сырьем.

В соответствии с поручением президента РФ В. В. Путина № ПР-1130 от 28.06.2022, постановлением Правительства и Постановлением Президиума РАН № 70 от 11.04.2023 по развитию минерально-сырьевой базы остродефицитных металлов для высокотехнологической промышленности, конференция считает целесообразным:

– объединить исследования ведущих организаций РАН, отраслевых институтов, вузов, инжиниринговых компаний



Работа конференции

по разработке экологически безопасных технологий извлечения стратегических материалов из комплексных руд сложного вещественного состава, выделения ценного сырья из гидроминеральных и техногенных источников;

- разработать и обеспечить промышленное производство высокоэффективных отечественных флотореагентов, экстрагентов и сорбентов для их применения в технологиях обогащения и селективного извлечения редких, редкоземельных и критических металлов;

- обеспечить создание нового отечественного оборудования для предварительного обогащения, дезинтеграции и обогащения (дробилки ударного действия, информационные и тяжелосредные сепараторы, флотационные машины и др.);

- разработать достоверные методы анализа и экспресс-анализа нетрадиционных форм нахождения редких, редкоземельных и критических металлов и современные методики in-situ изучения процессов сорбции реагентов, структурно-химических преобразований минералов в условиях физико-химических методов извлечения, растворения и экстракции ценных компонентов (приоритет ИПКОН РАН);

- рассматривать эффективность переработки и монетизацию горнопромышленных отходов как фактор устойчивого развития горно-металлургических компаний и снижения экологических рисков;

- развивать фундаментальные и прикладные исследования в области физических и химических методов обогащения с целью повышения извлечения ценных компонентов в условиях снижения качества минерально-сырьевой базы Российской Федерации;

- рекомендовать координацию и консолидацию исследований по разработке технологических процессов комплексного промышленного использования гидроминерального сырья для извлечения ценных, в том числе стратегически важных компонентов;

- особое внимание уделить развитию синтеза, производства и применения отечественных реагентов различных классов, в том числе с комплекссообразующими группировками класса азотсодержащих производных моно- и дикарбоновых кислот, алкилтиокарбаматов при обогащении редких и стратегических металлов, модифицированного поливинилкапролактама, а также флокулянтов и коагулянтов;

- расширить применение методов моделирования и искусственного интеллекта для совершенствования технологий обогащения, а также для оценки запасов редких металлов в рудном и техногенном сырье;

- считать необходимостью развитие научных и прикладных исследований в области горной экологии при переработке рудного и техногенного сырья;

- рассмотреть возможность проведения совместной работы с Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии по пересмотру (изменению и переутверждению) действующих стандартов на опробование руд и продуктов обогащения с учетом развития теории и практики опробования, а также потребностей горно-обогатительных предприятий в достоверном балансовом учете ценных компонентов;

- внести в Государственную думу предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы переработки отходов и получения дополнительной продукции;

- сформировать рабочую группу под руководством заведующего кафедрой ИРНТУ К. В. Федотова для анализа имеющейся учебно-методической базы в области ОПИ и ко-

ординации действий по разработке и модернизации основных образовательных программ высшего профессионального образования с учетом текущих и будущих потребностей предприятий, работающих в областях переработки минерального и техногенного сырья;

- считать целесообразным обратиться в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации по вопросу открытия отдельной специальности «Обогащение полезных ископаемых» высшего профессионального образования в Общероссийском классификаторе специальностей по образованию. Данная специальность имеется в области среднего профессионального образования – 21.02.18 «Обогащение полезных ископаемых». Кроме этого, имеется научная специальность 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых» в системе подготовки кадров высшей квалификации (кандидат и доктор наук);

- провести 50-ю, юбилейную, Международную конференцию «Плаксинские чтения – 2026» «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» 21–25 сентября 2026 года на площадке Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН.

Работа Международной конференции «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» («Плаксинские чтения – 2025») освещалась в средствах массовой информации (онлайн-ресурс УГГУ). Материалы опубликованы в сборнике «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» («Плаксинские чтения – 2025»), г. Екатеринбург, 29 сентября – 04 октября 2025 г.: материалы Международной конференции. Изд-во ИП Русских А. В., 524 с., постатейно размещаются на сайте научной электронной библиотеки (elibrary.ru), интегрированной с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), электронная версия доступна на сайте «Плаксинских чтений».

Совещание определило решение экологических проблем одной из главных задач горно-обогатительных предприятий. Для этого необходимо внедрять:

- очистку до ПДК шахтных, подотвалных и других технологических вод с извлечением ценных компонентов;

- разработку и внедрение экологически безопасных малоотходных технологий комплексного использования добытой руды, техногенных месторождений и отходов горно-обогатительных предприятий;

- применение экологически безопасных флотационных реагентов, получение и использование концентратов предельно высокого качества.

Научный совет РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых выражает благодарность ФГБОУ ВО «УГТУ» в лице ректора Г. И. Батрака за поддержку и организацию международного форума на высоком научно-техническом уровне.

Оргкомитет и участники конференции выражают признательность за поддержку Группе компаний «ТОМС», «Русской медной компании», «Уральской горно-металлургической компании», управляющей компании «Полиметалл», ООО «Берёзовский рудник», ПАО «Ураласбест», ООО «НПК «СПИРИТ», АО «НПК «Механобр-техника», ООО «Эрга», ООО «Таилс», ТД «Элма Asterion», ОАО «Уралмеханобр», ООО «УралАктив».

Значимость независимых факторов для извлечения металлов в раствор выщелачивания

В. И. Голик^{1✉}, С. Г. Страданченко², Ю. В. Дмитрак³,
В. А. Масленников⁴, Б. В. Дзеранов¹

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова»,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

³ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской
академии наук, г. Москва, Российская Федерация

⁴Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Российская Федерация
✉ v.i.golik@vail.ru

Аннотация: Проблема утилизации некондиционных руд и хвостов их обогащения становится актуальнее с увеличением потребности промышленности в металле. Ключ к ее решению – новые технологии, позволяющие управлять свойствами утилизируемых минералов путем воздействия на технологические процессы. Приведены сведения о механизме фазового превращения металлов в раствор и взаимодействии с нерудными компонентами пород. Детализировано влияние на извлечение металлов из сырья пирита и арсенопирита, атомарного хлора, кислорода и трехвалентного железа. Охарактеризовано влияние на физико-химические процессы переменных факторов: анодной плотности тока, температуры и других факторов. Определены уровни и интервалы варьирования независимых переменных факторов в экспериментах по плану Бокса – Бенкена. Реализация методики исследований позволяет оптимизировать параметры выщелачивания металлов, снизить затраты на их добычу и увеличить диапазон применения ресурсо- и природосберегающей технологии. Результаты исследования могут быть востребованы при оптимизации производства на действующих предприятиях и повышении качества проектов освоения новых месторождений, а также в процессе подготовки кадров высшей квалификации горной и обогащательной специальности.

Ключевые слова: выщелачивание, руда, исследование, варианты, переменные факторы, извлечение металлов

Для цитирования: Голик В.И., Страданченко С.Г., Дмитрак Ю.В., Масленников В.А., Дзеранов Б.В. Значимость независимых факторов для извлечения металлов в раствор выщелачивания. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):10-14. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-10-14>.

The importance of independent factors for extraction metals in the leaching solution

V. I. Golik^{1✉}, S. G. Stradanchenko², Yu. V. Dmitrak³,
V. A. Maslennikov⁴, B. V. Dzeranov¹

¹Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz,
Russian Federation

²South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

³Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation

⁴Institute of Service and Entrepreneurship (branch), DSTU, Shakhty, Russian Federation
✉ v.i.golik@vail.ru

Abstract: The problem of disposal of substandard ores and their enrichment tailings is becoming more urgent with the increasing demand of the industry for metal. The key to solving this problem is new technologies that make it possible to control the properties of recyclable minerals by influencing technological processes. Information is provided on the mechanism of phase transformation of metals into solution and interaction with non-metallic rock components. The effect of atomic chlorine, oxygen, and trivalent iron on

the extraction of metals from pyrite and arsenopyrite raw materials is detailed. The influence of variable factors on physico-chemical processes is characterized: anode current density, temperature, and other factors. The levels and intervals of variation of independent variables of factors in experiments according to the Box-Behnken plan are determined. The implementation of the research methodology makes it possible to optimize the parameters of metal leaching, reduce the cost of their extraction and increase the range of applications of resource- and nature-saving technology. The research results may be in demand when optimizing production at existing enterprises and improving the quality of projects for the development of new fields, as well as in the process of training highly qualified personnel in mining and processing specialties.

Keywords: leaching, ore, research, variants, variable factors, metal, extraction

For citation: Golik V.I., Stradanchenko S.G., Dmitrak Yu.V., Maslennikov V.A., Dzeranov B.V. The importance of independent factors for extraction metals in the leaching solution. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):10-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-10-14>.

Введение

Выщелачивание – процесс избирательного извлечения компонентов, в ходе которого металлы из металлосодержащего сырья извлекаются путем их перевода в растворимую фазу. Скорость процесса этого перевода определяется скоростью движения выщелачивающего раствора через выщелачиваемый материал, который снижает наличие мелких рудных фракции [1–3].

Сравнительно короткая история развития технологий выщелачивания, связанная с добычей урана, золота и свинца, приведена в работах [4–6].

До настоящего времени процесс выщелачивания применяется там, где традиционные технологии разработки или неосуществимы, или высокочрезвычайны [7–9]. Кислотное выщелачивание применяется при обогащении сульфидных хвостов обогащения с низким содержанием металлов и характеризуется большей производительностью и меньшей продолжительностью выщелачивания металлов. Скорость извлечения металлов адекватно изменяется в зависимости от параметров технологических процессов [10–12].

Исследуемое направление совершенствования технологий разработки рудных месторождений находится в числе приоритетных в России и за рубежом [13–15].

Прогресс технологии выщелачивания металлов вызвал к жизни появление новых решений в области их совершенствования [16–18], что актуализирует продолжение исследований и затронутую тему [19–21].

Скорость движения растворов определяется величиной разрыхления горной массы (рис. 1).

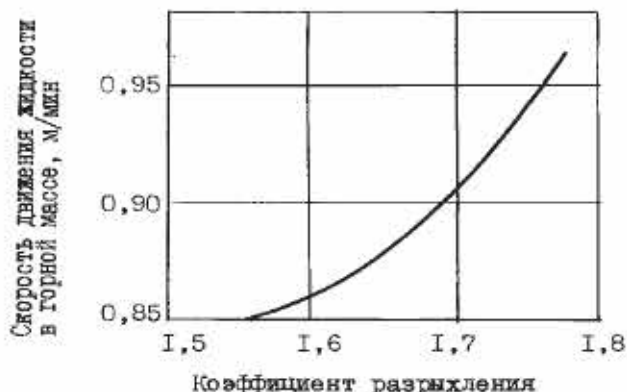


Рис. 1. Зависимость скорости движения растворов от разрыхления материала /

Fig. 1. Dependence of the velocity of movement of solutions on the loosening of the material

Проницаемость растворов снижается при наличии в руде глины (рис. 2).

Для повышения извлечения металлов из минерального сырья пульпу перемешивают с достаточной интенсивностью для исключения застойных зон или активируют в дезинтеграторах, мельницах и т. п. Эти воздействия целесообразны при извлечении металлов из уже измельченных руд и хвостов их обогащения.

Цель исследований: обоснование методики эффективности применения технологии с выщелачиванием в рамках системы разработки рудных месторождений с избирательным извлечением минеральных компонентов путем перевода их в растворимую фазу.

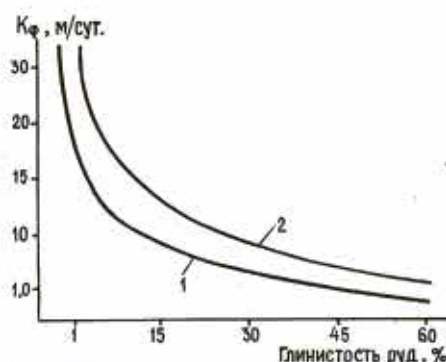


Рис. 2. Зависимость проницаемости руд от наличия глины pH: 1 – pH = 2; 2 – pH = 3 /

Fig. 2. Dependence of ore permeability on the presence of clay pH: 1 – pH = 2; 2 – pH = 3

Методы исследований

Применялись следующие методы: обобщение опыта, анализ результатов, производственный эксперимент и технико-экономические расчеты.

Основной метод исследования – экспериментальное сравнение режимов переработки. В том числе проводилось агитационное выщелачивание активированных руд и хвостов, а также выщелачивание растворами реагентов в дезинтеграторе.

Переменными факторами выщелачивания металлов являлись: состав минерального сырья, соотношение количества выщелачивающего раствора и руд, продолжительность выщелачивания и параметры активаторов.

Рациональные значения факторов определялись экспериментально, причем пределы варьирования принимались по технологическим соображениям равномерного извлечения металлов из выщелачиваемого материала и предотвращения перехода в раствор веществ, усложняющих извлечение металлов из растворов и т. п.

Результаты исследований

Агитационное выщелачивание

Регламент эксперимента:

- приготовление 50 г высушенного материала;
- подготовка раствора в количестве, достаточном для эксперимента при отношении Ж:Т;
- смешивание материала с раствором и собственно выщелачивание;
- фильтрация раствора и анализ содержания в нем металлов.

Уровни и интервалы варьирования независимых факторов в экспериментах приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Пределы изменения независимых факторов /
Limits of change of Independent factors

Уровень и интервал варьирования	Независимый фактор			
	Концентрация серной кислоты, X_1 , г/л	Концентрация хлорида натрия, X_2 , г/л	Отношение жидкого к твердому, X_3 , ед.	Время, X_4 , ч
Нулевой уровень, $X_i = 0$	5,5	85	7	0,630
Интервал варьирования	4,5	74	3	0,390
Верхний уровень, $X_i = -1$	10,4	150	10	1,050
Нижний уровень, $X_i = 1$	2,3	25	4	0,255

Агитационное выщелачивание после активации

Пределы изменения независимых факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Пределы изменения независимых факторов /
Limits of change of Independent factors

Уровень и интервал варьирования	Независимый фактор			
	Концентрация серной кислоты, X_1 , г/л	Концентрация хлорида натрия, X_2 , г/л	Продолжительность, X_3 , час	Скорость роторов, X_4 , Гц
Нулевой уровень, $X_i = 0$	6,2	93	0,620	127
Интервал варьирования	4,5	75	0,380	77
Верхний уровень, $X_i = -1$	10,2	162	1,100	220
Нижний уровень, $X_i = 1$	2,5	25	0,254	52

Регламент эксперимента:

- приготовление 60...70 г высушенного материала с компенсацией уноса материала при активации;
- активация с заданной частотой вращения роторов;
- приготовление раствора с заданным отношением Ж:Т;
- смешивание материала с раствором и собственно выщелачивание;
- фильтрация раствора и анализ содержания металлов.

Выщелачивание в дезинтеграторе

Уровни и интервалы варьирования независимых факторов в экспериментах приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Пределы изменения независимых факторов /
Limits of change of Independent factors

Уровень и интервал варьирования	Независимый фактор			
	Концентрация серной кислоты, X_1 , г/л	Концентрация хлорида натрия, X_2 , г/л	Отношение жидкого к твердому, X_3 , ед.	Скорость роторов, X_4 , Гц
Нулевой уровень, $X_i = 0$	6,2	95	7,2	135
Интервал варьирования	4,3	73	3,2	80
Верхний уровень, $X_i = -1$	10,1	162	11,0	205
Нижний уровень, $X_i = 1$	2,0	20	4,5	53

Регламент эксперимента:

- приготовление 50 г высушенного материала;
- подготовка раствора заданного состава при заданном соотношении Ж:Т;
- приготовление пульпы;
- собственно выщелачивание с заданной скоростью;
- фильтрация раствора и анализ содержания в нем металлов.

Сравнивая значения извлечения металлов при рациональных параметрах различных режимов выщелачивания, а также учитывая показатели затрат энергии на осуществление процесса и износ оборудования, определяют лучший вариант выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Голык В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации. *Обогащение руд*. 2010; 5: 38-40. Golik V.I. Extraction of metals from tailings of enrichment by combined activation methods. *Ore enrichment*. 2010; 5: 38-40. (In Russ.).
- Minagawa M., Hisatomi S., Kato T., et al. Enhancement of copper dissolution by mechanochemical activation of copper ores: Correlation between leaching experiments and DEM simulations. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29 (3): 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.11.03>.
- Аренс В.Ж., Гридин О.М., Дербунович Н.Н. и др. Опыт подземного выщелачивания желваковых фосфоритов. *Горный журнал*. 2016; 6: 56-63. Arens V.Zh., Gridin O.M., Derbunovich N.N., et al. Experience of underground leaching of nodular phosphorites. *Mining Journal*. 2016; 6: 56-63. (In Russ.).
- Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голык В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020; 5 (2): 104-118.

- Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental protection and resource-saving technologies of underground ore mining in energy-damaged massifs. *Mining Sciences and Technologies*. 2020; 5 (2): 104-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>.
5. Дмйтрак Ю.В., Цыдаев Б.С., Дзапаров В.Х. и др. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России. *Вектор Гео Наук*. 2019; 1: 9-18. Dmitrak Yu.V., Tsidaev B.S., Dzaparov V.Kh., Kharebov G.H. Mineral resource base of non-ferrous metallurgy of Russia. *Vector of Geo Sciences*. 2019; 1: 9-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>.
 6. Bloodworth A., Gumm G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*. 2012; 15: 90-97.
 7. Авдеев П.Б., Овешников Ю.М. Опыт применения кучного выпелачивания на рудных карьерах Забайкалья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014; 4: 15-25. Avdeev P.B., Oveshnikov Yu.M. The experience of using heap leaching in the ore pits of Transbaikalia. *Mining information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 4: 15-25. (In Russ.).
 8. Морозов А.А., Смагин А.П., Безносков Г.Ф. и др. Техничко-экономическая оценка эффективности блочного подземного выпелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля. *Горный журнал*. 2013; 8-2: 134-140. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., et al. Technical and economic assessment of the effectiveness of block underground leaching of uranium from poor ores of the Streltsovsky ore field. *Mining Journal*. 2013; 8-2: 134-140. (In Russ.).
 9. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., et al. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016; 8 (1): 46-51.
 10. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. и др. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 12 (2 (44)): 283-290. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., et al. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous territories*. 2020; 12 (2 (44)): 283-290. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>.
 11. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б. и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415. Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3 (49)): 405-415. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
 12. Nayak A., Ashrit S., Jena M.S., et al. Mineralogical characterization for selection of possible beneficiation route for low-grade lead-zinc ore of Rampura Agucha, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020; 73(3): 775-784. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01887-y>.
 13. Валиев Н.Г., Головырин С.С., Макаров В.В. К вопросу об использовании систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства (проблематика решения задач современного горного производства с использованием мультиагентных систем). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017; 23: 134-139. Valiev N.G., Golovyryn S.S., Makarov V.V. On the issue of using artificial intelligence systems in audit procedures of modern mining production (problems of solving problems of modern mining production using multi-agent systems). *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 23: 134-139. (In Russ.).
 14. Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. 2016; 7 (44): 257-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_13.
 15. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., et al. Spatial data and technologies for geomonitoring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020; 1: 69-74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>.
 16. Голик В.И., Дмйтрак Ю.В., Комашенко В.И. и др. Геофизические методы контроля руд при выпелачивании. *Геофизика*. 2018; 1: 85-91. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., et al. Geophysical methods of ore control during leaching. *Geophysics*. 2018; 1: 85-91. (In Russ.).
 17. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. Теория и практика применения комбинированных физико-химических и энергетических воздействий на геоматериалы и водные суспензии. *Горный журнал*. 2017; 11: 123-128. Bunin I.Zh., Ryazantseva M.V., Samusev A.L., et al. Theory and practice of applying combined physico-chemical and energy effects on geomaterials and aqueous suspensions. *Mining Journal*. 2017; 11: 123-128. (In Russ.).
 18. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выпелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (1): 130-141. Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of persistent primary ores of the Malmyzhskoye deposit. *Mining information and analytical bulletin*. 2023. (1): 130-141. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.
 19. Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P., et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering*. 2022; 183: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>.
 20. Моргоева А.Д., Манджиева С.С., Киричков М.В. и др. Исследование моделей машинного обучения для оценки влияния угольных горно-энергетических предприятий на экосистемы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024; 16 (3): 1130-1143. Morgoeva A.D., Mandzhieva S.S., Kirichkov M.V., et al. Machine learning models study for assessing the effect of coal mining and energy enterprises on ecosystems. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024; 16 (3): 1130-1143. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1130-1143>.
 21. Khayrutdinov A., Kongar-Suryun Ch., Kowalik T., et al. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite enrichment waste for non-waste geotechnology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867 (1): 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович Голик –
д-р техн. наук, профессор, Геофизический институт
Владикавказского научного центра РАН, 362002, PCO-
Алания, г. Владикавказ, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@vail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Golik –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Geophysical Institute of the
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of
Sciences, 362002, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz; Russian
Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>;
e-mail: v.i.golik@vail.ru

Сергей Георгиевич Страданченко –

д-р техн. наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета, 346428, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: ssg72@mail.ru

Юрий Витальевич Дмитрак –

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, начальник отдела моделирования и управления горнотехническими системами, ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Станислав Александрович Масленников –

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, 346500, г. Шахты, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: mail@sssu.ru

Борис Витальевич Дзеранов –

канд. геол.-мин. наук, главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра РАН, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, Российская Федерация; e-mail: dzboris@gmail.com

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.08.2025

Поступила после рецензирования: 03.10.2025

Принята к публикации: 08.10.2025

Sergey G. Stradanchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the South Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: ssg72@mail.ru

Yuri V. Dmitrak –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Modeling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Stanislav A. Maslennikov –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (branch), DSTU, 346500, Shakhty, Rostov region, Russian Federation; e-mail: mail@sssu.ru

Boris V. Dzeranov –

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Chief Researcher at the Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 362002, North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Russian Federation; e-mail: dzboris@gmail.com

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 20.08.2025

Revised: 03.10.2025

Accepted: 08.10.2025

Исследование влияния горно-геологических условий Бейского месторождения и режима горных работ на схему вскрытия и порядок отработки

В. Е. Кисляков, А. В. Шварцкопф, А. С. Федотов[✉]

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Аннотация: Известно, что режим горных работ является одним из основных факторов, оказывающих влияние на экономическую эффективность освоения месторождения. На стадиях разработки проектной документации порядок отработки месторождения определяется таким образом, чтобы обеспечить проектную производственную мощность с минимальными объемами вскрышных работ. От этого зависит схема вскрытия месторождения. Особо важную роль порядок отработки играет при освоении месторождений с двумя и более рабочими зонами. Приведены результаты анализа горно-геологических условий Бейского каменноугольного месторождения, где отработка участков месторождения осуществляется двумя рабочими зонами по разным группам пластов. Несмотря на очевидную выгоду отработки одной из групп пластов, в перспективе такая неравномерная отработка создает негативные условия для последующих периодов эксплуатации месторождения. По результатам анализа сформулированы основные причины такого порядка отработки, обозначены потенциальные негативные последствия и дальнейшие цели исследования.

Ключевые слова: каменноугольное месторождение, схема вскрытия, отработка различными рабочими зонами, порядок отработки, режим горных работ, коэффициент вскрыши

Для цитирования: Кисляков В.Е., Шварцкопф А.В., Федотов А.С. Исследование влияния горно-геологических условий Бейского месторождения и режима горных работ на схему вскрытия и порядок отработки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):15-20. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-15-20>.

Study of the influence of mining and geological conditions of the Beyskoye deposit and the mining mode on the opening scheme and the order of development

V. E. Kislyakov, A. V. Shwartzkopf, A. S. Fedotov[✉]

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University»,
Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ ar.fedotow@yandex.ru

Abstract: It is known that the mode of mining operations is one of the main factors influencing the economic efficiency of deposit development. At the stages of development of design documentation, the order of deposit development is determined in such a way as to ensure the design production capacity with minimum volumes of overburden operations, which in turn determines the scheme of deposit opening. The order of development plays a particularly important role in the development of deposits with two or more working zones. The paper presents the results of the analysis of the mining and geological conditions of the Bey coal deposit, where the development of deposit sections is carried out by two working zones in different groups of seams. Despite the obvious benefit of developing one of the groups of seams, in the long term, such uneven development creates negative conditions for subsequent periods of deposit operation. Based on the analysis results, the main reasons for such a development order are formulated, potential negative consequences are identified and further research objectives are formulated.

Keywords: mining mode, mining procedure, opening scheme, stripping ratio, coal deposit, mining in different working zones

For citation: Kislyakov V.E., Shwartzkopf A.V., Fedotov A.S. Study of the influence of mining and geological conditions of the Beyskoye deposit and the mining mode on the opening scheme and the order of development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-15-20>.

Введение

Управление режимом горных работ с целью снижения объемов вскрыши и соответствующих затрат при неизменном уровне добычи является основным и наиболее часто применяемым инструментом снижения эксплуатационных затрат [1–3]. Учитывая нестабильную конъюнктуру на рынке угля, стремление недропользователей вести добычу с более низким коэффициентом вскрыши встречается все чаще.

Как правило, основными инструментами реализации таких решений являются: увеличение угла наклона рабочего борта за счет переноса периода отработки верхних вскрышных уступов на более поздний период [4]; сдвигание вскрышных уступов и формирование временного нерабочего борта [5, 6] в зоне с более высоким коэффициентом вскрыши или соответствующее изменение направления развития горных работ в сторону меньшего коэффициента вскрыши; а также формирование временных отвалов [7, 8].

Такие решения позволяют достичь желаемого эффекта в краткосрочной перспективе, но создают проблемы для последующей отработки. Совместная или раздельная реализация описанных решений по управлению режимом горных работ приводит к одному результату: из-за наличия накопленного отставания по отработке вскрышных уступов происходит резкое увеличение коэффициента вскрыши в последующие годы, что негативно влияет на общую доходность предприятия. Тем самым в погоне за краткосрочной выгодой недропользователи накапливают необходимость дальнейших больших вложений вместо плавного их распределения по годам.

В связи с этим на этапе проектирования необходимо детальное изучение изменчивости коэффициента вскрыши по периодам эксплуатации, оценка влияния порядка отработки месторождения и схемы вскрытия на режим горных работ, определение зависимости доходности предприятия (чистый дисконтированный доход, индекс доходности) от режима горных работ и определение ключевых граничных значений технологических показателей (коэффициент вскрыши, расстояние транспортирования и др.), при достижении или превышении которых доходность предприятия становится нулевой или отрицательной.

Цель исследований: анализ горно-геологических условий и оценка их влияния на выбор существующей схемы вскрытия и порядка отработки участка, а также оценка рисков дальнейшего развития принятой схемы и порядка отработки.

Материал и методы исследования

В качестве материалов для исследования приняты геологические материалы разных годов выполнения, созданная с их использованием объемная модель месторождения, а также

материалы о современном состоянии горных работ. Основные методы исследования, применяемые в настоящей работе, – анализ и моделирование (объемное и математическое), которые были осуществлены с помощью наиболее распространенных программных комплексов AutoCAD, Micromine, Microsoft Excel.

Объектом исследования является участок «Майрынский», отрабатывающий часть Бейского каменноугольного месторождения. Наиболее полно проблемы участка описаны в работе [9].

Одной из главных особенностей с технологической точки зрения является выделение групп пластов (верхняя и нижняя) и их отработка двумя рабочими зонами. По своей сути это два разреза, отрабатывающие одну часть залежи с перспективой объединения их в один разрез. Вскрытие предусмотрено производить обособленно для каждой группы пластов, и каждая рабочая зона имеет свои горнотехнические показатели и особенности, а поэтому рассматривается отдельно. В упрощенном представлении схема работы представлена на рисунке 1.

Результаты исследований

Исследование изменчивости мощности вскрышных пород и угальных пластов

На исследуемом участке отложения четвертичного возраста сложены гравийно-галечниковыми отложениями в основном с песчаным и супесчаным заполнителем и имеют мощность от 8 до 33 м, в среднем – 12,3 м.

Вмещающие коренные породы представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами, составляющими группу полускальных (95 %) и скальных пород (5 %).

Строение пластов в большинстве своем сложное, редко – простое. Пласты состоят из двух-восьми пачек (пласт 19). Мощности угльных прослоев, разделяющих угльные пачки, изменяются от 0,05 до 1,0 м. Нередко наблюдается расщепление угльных пластов на самостоятельные пачки. Мощности угльных пластов и их междупластий подвержены значительным колебаниям.

Угльные пласты залегают друг от друга на расстоянии от 1,0 до 30,0 м. Пласты нерабочей мощности имеют ограниченное площадное распространение.

На рисунках 2 и 3 представлены средние значения мощностей угльных пластов и междупластий.

Анализируя представленные гистограммы можно сделать вывод, что пласты верхней группы наиболее производительны и их отработка наиболее эффективна с организационной точки зрения. Средняя мощность междупластий по основным пластам верхней группы позволяет вести работы уступами высотой 10–15 м, что наиболее эффективно в сравнении с мощностью междупластий нижней группы.

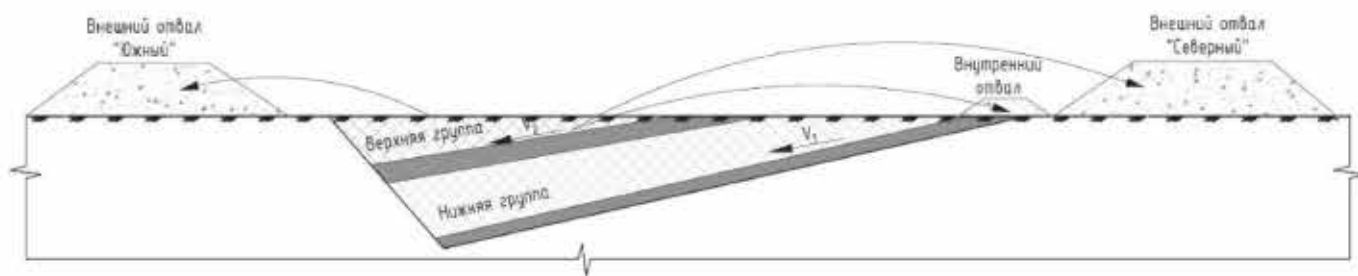


Рис. 1. Схема отработки месторождения в упрощенном представлении /
Fig. 1. Simplified representation of the deposit mining scheme

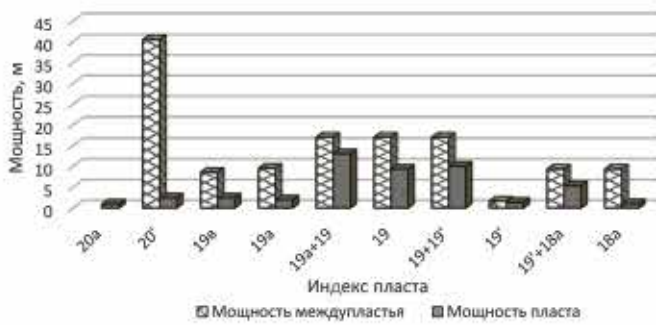


Рис. 2. Средние значения мощности междупласта и угольных пластов по верхней группе пластов /
Fig. 2. Average values of interbed and coal seam thickness for the upper group of seams

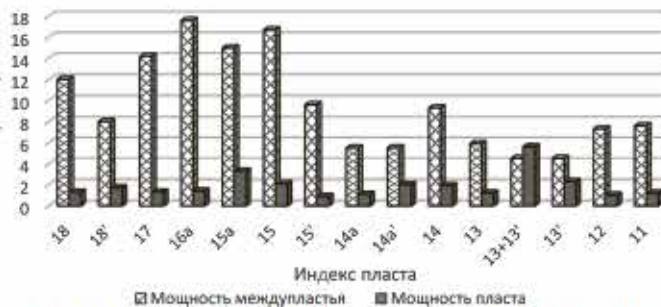


Рис. 3. Средние значения мощности междупласта и угольных пластов по нижней группе пластов /
Fig. 3. Average values of interbed thickness and coal seams for the lower group of seams

Исследование режима горных работ

Для исследования изменчивости режима горных работ и коэффициента вскрыши по этапам отработки поле разреза было разделено на этапы равной ширины (ширина этапа – 100 м), по которым были произведены подсчеты объемов угля и вскрыши.

Графики этапных объемов нарастающим итогом по группам пластов и графики изменения коэффициента вскрыши представлены на рисунках 4 и 5.

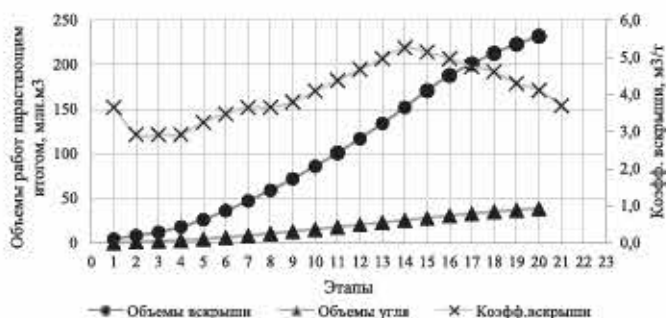


Рис. 4. Этапные объемы нарастающим итогом и коэффициент вскрыши по верхней группе пластов /
Fig. 4. Staged volumes cumulative total and stripping ratio for the upper group of layers

По верхней группе на протяжении 8 этапов коэффициент вскрыши ($K_{вск}$) в среднем составляет $3,3 \text{ м}^3/\text{т}$, по нижней группе на протяжении 11 этапов $K_{вск} = 3,7 \text{ м}^3/\text{т}$. На последующих этапах отмечается его постоянный рост. В связи с этим можно сделать вывод, что на первоначальных этапах более выгодной является отработка верхней группы пластов.

Принимая во внимание то, что по мере отработки будет

происходить постоянное увеличение глубины, определена соответствующая зависимость коэффициента вскрыши от глубины отработки по группам пластов, которая представлена на рисунке 5.

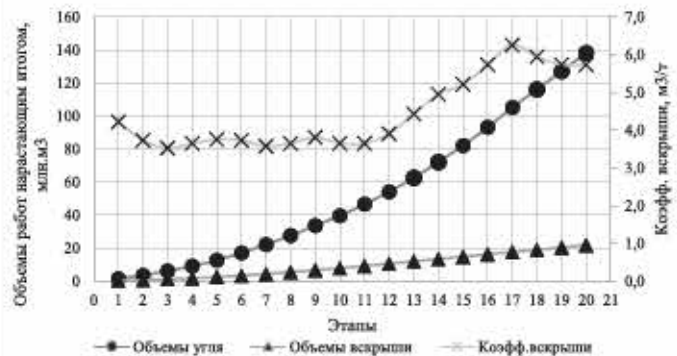


Рис. 5. Этапные объемы нарастающим итогом и коэффициент вскрыши по нижней группе пластов /
Fig. 5. Staged volumes cumulative total and stripping ratio for the lower group of layers

Сопоставляя информацию об этапных объемах горных работ и изменчивости коэффициента вскрыши (рис. 4 и 5) по группам пластов, можно отметить, что изменчивость коэффициента вскрыши по обеим группам имеет общий характер.

Анализ графика на рисунке 6 демонстрирует логичную изменчивость коэффициента вскрыши без пиковых значений, что соответствует рассматриваемым горно-геологическим условиям. Полученную зависимость допустимо использовать для предварительного прогноза коэффициента вскрыши на заданной глубине.

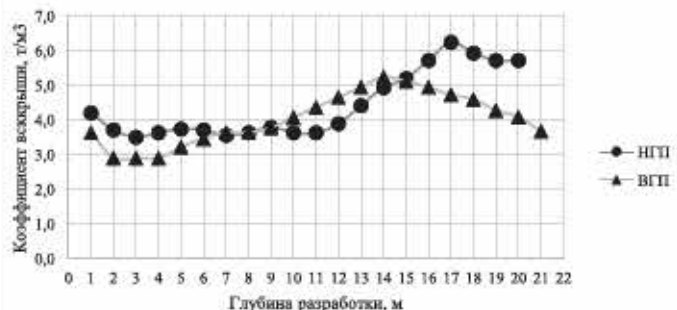


Рис. 6. Зависимость коэффициента вскрыши от глубины отработки /
Fig. 6. Dependence of the stripping ratio on the mining depth

Обсуждение результатов

На основании проведенного анализа сформулированы причины неравномерной отработки с акцентом на верхнюю группу пластов:

- сравнительно невысокий коэффициент вскрыши, который плавно увеличивается без пиковых значений по мере увеличения глубины;
- более высокая производительность основных рабочих пластов в сравнении с нижней группой пластов;
- высокий уровень качества угля верхней группы пластов, позволяющих реализовывать его без обогащения;
- за счет того, что отвалообразование при отработке верхней группы пластов осуществляется на внешнем отвале со стороны рабочего борта, происходит постоянное снижение расстояния транспортирования.

Опыт отработки месторождения показал: пласты верхней

группы имеют более качественные характеристики, что позволяет реализовать их по более высоким ценам. А проведенная сравнительная оценка пластов по мощности позволяет сделать вывод, что пласты верхней группы более производительные, а это упрощает организацию работы и положительно влияет на уровень производительности добычного оборудования.

Организация работ по отработке нижней группы пластов имеет ряд ограничений:

- из-за малой мощности пластов;
- короткого фронта горных работ;
- возможного уровня производственной мощности.

Отработка пластов малой мощности негативно влияет на производительность оборудования, усложняется организация работы и выполаживается рабочий борт, а при отработке тонких пластов с углами падения 5 и более градусов усложняется схема их отработки. Поэтому на данный момент отработка нижней группы пластов осуществляется по остаточному принципу.

Несмотря на сравнительно высокую эффективность отработки верхней группы пластов, неравномерная отработка имеет и негативные стороны, которые в настоящий момент могут не приносить значительного ущерба, но в накопленном итоге могут оказать значительную финансовую нагрузку.

Последствия неравномерной отработки:

- невозможность строительства отвалов в выработанном пространстве из-за наличия неотработанных запасов;
- изъятие большого количества земель под внешние отвалы с первых лет после начала отработки и повышение экологической нагрузки на район присутствия;
- увеличивающиеся экономические издержки, связанные с платой за размещение внешних отвалов;
- образование выработанного пространства как техногенного ресурса на верхней группе пластов, которое невозможно использовать [9–11];
- перенос работ по полноценному вскрытию нижней группы пластов и создания фронта горных работ снижает возможность оперативного увеличения производственной мощности в случае такой необходимости.

Учитывая эффективность отработки верхней группы пластов за счет расположения внешнего отвала со стороны рабочего борта и постоянного уменьшения расстояния транспортирования в дальнейшем, следует отметить, что отсутствие выработанного пространства под внутренний отвал приведет к резкому увеличению расстояния транспортировки, так как емкости отвала не хватит на весь период отработки верхней группы пластов.

Заключение

1. Основываясь на результатах проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что принятый в настоящее время порядок отработки месторождения недостаточно эффективен для рассматриваемых условий и создает негативные условия для последующих лет отработки.

2. Перераспределение нагрузки на рабочие зоны, то есть изменение порядка отработки, позволит:

– равномерно распределить добычную нагрузку на группы пластов, что даст возможность наиболее оперативно подстраиваться под изменение производственной мощности;

– обеспечить разрез выработанным пространством для внутреннего отвалообразования, тем самым сократить среднее значения расстояния транспортирования и снизить интенсивность отчуждения земель под внешние отвалы и платы за это.

3. Для разработки наиболее эффективных рекомендаций по изменению порядка отработки необходимо продолжение исследований со следующими целями:

– определение минимальной и максимальной производственных мощностей для каждой группы пластов по условию эффективности отработки;

– исследование зависимости транспортной работы от долевого участия различных отвалов в отвалообразовании и определение оптимального распределения между отвалами [12–15];

– определение зависимости доходности предприятия от различных вариантов режима горных работ и порядка отработки.

4. Достижение обозначенных целей позволит обоснованно заявлять о наиболее рациональном уровне производственных мощностей по группам пластов, позволяющем вести стабильную работу с минимумом экономических издержек. Опыт реализации предложенных решений возможно использовать на смежном участке рассматриваемого месторождения, где отработка осуществляется в похожих горно-геологических условиях. Единственным существенным различием является отсутствие внешнего отвала со стороны рабочего борта, что в свою очередь еще активнее снижает эффективность при концентрации работ на верхней группе пластов.

Выводы

1. В статье приведены результаты анализа горно-геологических условий Бейского месторождения каменного угля и оценка их влияния на выбор схемы вскрытия и порядка отработки.

2. В результате анализа определены предпосылки для выбора существующей схемы вскрытия и порядка отработки, которые позволили осуществить ввод в эксплуатацию с минимальными экономическими издержками. Анализ также показал, что дальнейшее развитие принятого порядка отработки приведет к повышению экономических издержек из-за невозможности полноценного использования выработанного пространства.

3. Для минимизации прогнозируемых рисков определены первоначальные задачи дальнейшего исследования, по результатам которых будут разработаны и предложены решения по оптимизации порядка отработки.

4. Отмеченные в данной работе риски приведенной схемы вскрытия и порядка отработки могут быть учтены при проектировании месторождений с аналогичными условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кортелев О.Б., Ческидов В.И., Норри В.К. Влияние параметров рабочей зоны на режим горных работ и границы карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2011; 5: 53-59.
Korteleev O.B., Cheskidov V.I., Norri V.K. Influence of working area parameters on the mining mode and quarry boundaries. *Physical and technical problems of mineral development*. 2011; 5: 53-59. (In Russ.).

2. Таланин В.В., Бехер В.Г., Казаков В.А. Особенности регулирования режима открытых горных работ в условиях волатильности рынка угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023; 5: 142-154.
Talanin V.V., Bekher V.G., Kazakov V.A. Features of regulation of open-pit mining mode in conditions of coal market volatility. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2023; 5: 142-154. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_142.
3. Канзычаков С.В., Лапаев В.Н., Соколовский А.В. Развитие горных работ на разрезе: методический подход к управлению. *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2012; 3: 73-76.
Kanzychakov S.V., Lapaev V.N., Sokolovsky A.V. Development of open-pit mining operations: a methodological approach to management. *Bulletin of Nosov Moscow State Technical University*. 2012; 3: 73-76. (In Russ.).
4. Холодняков Д.Г., Логинов Е.В. Управление режимом горных работ и углом откоса рабочего борта карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015; 2: 71-74.
Kholodnyakov D.G., Loginov E.V. Management of mining operations and the slope angle of the working side of the quarry. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 2: 71-74. (In Russ.).
5. Черепанов Е.В. Обоснование технологии горных работ на рудных карьерах, имеющих отставание по вскрышке. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2006; 5 (12): 267-270.
Cherepanov E.V. Justification of mining technology at ore quarries with a lag in overburden. *Siberian Aerospace Journal*. 2006; 5 (12): 267-270. (In Russ.).
6. Косолапов А.И., Черепанов Е.В. О технологических возможностях управления вскрышными работами на рудных карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013; 7: 40-46.
Kosolapov A.I., Cherepanov E.V. On the technological capabilities of managing overburden operations at ore quarries. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; 7: 40-46. (In Russ.).
7. Зейтинова Ш.Б., Италмасова А.Р. Регулирование режима горных работ за счет применения временных отвалов. *Труды университета*. 2020; 1 (78): 159-163.
Zeitynova Sh.B., Italmasova A.R. Regulation of the mining mode through the use of temporary dumps. *Proceedings of the University*. 2020; 1 (78): 159-163. (In Russ.).
8. Сысоев А.А., Литвин Я.О. О планировании объемов автомобильной вскрышки для размещения во временных отвалах. *Вестник КузГТУ*. 2011; 4: 45-47.
Sysoev A.A., Litvin Ya.O. On planning the volumes of automobile cuttings for placement in temporary dumps. *Bulletin of KuzSTU*. 2011; 4: 45-47. (In Russ.).
9. Косолапов А.И., Кисляков В.Е., Федотов А.С., Шварцкопф А.В. Условия и проблемы разработки Бейского месторождения каменного угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 1: 25-29.
Kosolapov A.I., Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Schwarzkopf A.V. Conditions and problems of development of the Beyskoye coal deposit. *Mine surveying and subsoil use*. 2025; 1: 25-29. (In Russ.).
10. Еременко Е.В., Косолапов А.И. К вопросу управления техногенным ресурсом карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015; 1-1: 249-259.
Eremenko E.V., Kosolapov A.I. On the issue of quarry technogenic resource management. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 1-1: 249-259. (In Russ.).
11. Еременко Е.В. Обоснование направления развития фронта горных работ на основе закономерностей формирования техногенного ресурса. *Горная промышленность*. 2016; 3 (127): 86-88.
Eremenko E.V. Justification of the direction of development of the mining front based on the patterns of formation of the technogenic resource. *Mining industry*. 2016; 3 (127): 86-88. (In Russ.).
12. Селюков А.В. О технологической значимости внутреннего отвалообразования при открытой разработке угольных месторождений Кемеровской области. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015; 5: 23-34.
Selyukov A.V. On the technological significance of internal waste dumping during open-pit mining of coal deposits in the Kemerovo region. *Physical and technical problems of mineral development*. 2015; 5: 23-34. (In Russ.).
13. Ракисhev Б.Р., Молдабаев С.К. Оптимальное распределение объемов вскрышных пород между внешним и внутренним отвалами в пределах карьерного поля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012; 9: 47-55.
Rakishev B.R., Moldabaev S.K. Optimal Distribution of Overburden Volumes between External and Internal Dumps within a Quarry Field. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012; 9: 47-55. (In Russ.).
14. Селюков А.В. Оценка численного моделирования процесса адаптации внутреннего отвалообразования к режиму действующих карьерных полей Кемеровской области. *Известия ТПУ*. 2015; 12: 60-71.
Selyukov A.V. Evaluation of Numerical Modeling of the Adaptation Process of Internal Dumping to the Regime of Operating Quarry Fields in Kemerovo region. *TPU Bulletin*. 2015; 12: 60-71. (In Russ.).
15. Радченко С.А., Левченко Я.В. Формирование вскрышных грузопотоков при отработке крупных угольных брахисинклиналей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013; 6: 52-57.
Radchenko S.A., Levchenko Ya.V. Formation of Overburden Freight Flows during Development of Large Coal Brachysynclines. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2013; 6: 52-57. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Евгеньевич Кисляков –
д-р техн. наук, профессор кафедры открытых горных работ Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660025, г. Красноярск, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Viktor E. Kislyakov –
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Open-pit Mining Department of the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, 660025, Krasnoyarsk, Russian Federation

Андрей Валериевич Шварцкопф –
аспирант кафедры открытых горных работ Института
цветных металлов Сибирского федерального
университета, 660025,
г. Красноярск, Российская Федерация

Артём Сергеевич Федотов –
аспирант кафедры открытых горных работ Института
цветных металлов Сибирского федерального университета,
660025, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail:
ar.fedotow@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Критерии авторства: Авторы внесли равный вклад в
проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.07.2025.

Поступила после рецензирования: 07.09.2025.

Принята к публикации: 11.07.2025

Andrey V. Schwarzkopf –
PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal
University, 660025, Krasnoyarsk, Russian Federation

Artem S. Fedotov –
PhD student, Department of Open Pit Mining, Siberian Federal
University, 660025, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail:
ar.fedotow@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9552-2956>

Contribution: The authors contributed equally to the research
and preparation of the manuscript.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 14.07.2025.

Revised: 07.09.2025.

Accepted: 11.07.2025.

Осесимметричная задача сдвижения массива линейно-деформируемых горных пород при подземной отработке

А. А. Григорьев[✉], А. М. Григорьев, А. В. Зинченко, К. Б. Пономаренко
ОАО «ВНОГЕМ», лаборатория горного давления и сдвижения горных пород, г. Белгород,
Российская Федерация
✉ grand_982@mail.ru

Аннотация: Для прогнозной оценки последствий ведения подземных горных работ рассмотрены два варианта математических моделей сдвижения горных пород в осесимметричной постановке. Для однородного изотропного линейно-деформируемого массива интегральным преобразованием Ханкеля получены решения. На приведенных примерах показаны возможности моделирования: какие результаты могут быть получены и в какой форме они представлены. Показано изменение мульды оседания при развитии горных работ. Построены графики применяемых для контроля сдвижения оседаний, горизонтальных смещений и деформаций. Выполнена оценка влияния на результаты расчета изменения механических характеристик (коэффициента поперечного расширения) массива. Результаты исследований могут быть полезными при оценке вредного воздействия горных работ на наземные сооружения и природные объекты.

Ключевые слова: подземные горные работы, оседания, сдвижение горных пород, краевая задача, граничные условия, преобразование Ханкеля, горизонтальные смещения и деформации

Для цитирования: Григорьев А.А., Григорьев А.М., Зинченко А.В., Пономаренко К.Б. Осесимметричная задача сдвижения массива линейно-деформируемых горных пород при подземной отработке. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):21-25. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-21-25>.

The axisymmetric problem of the displacement massif a linear-deformable rock mass during the underground mining

A. A. Grigoryev[✉], A. M. Grigoryev, A. V. Zinchenko, K. B. Ponomarenko
VIOGEM, laboratory of rock pressure and displacement rock mass, Belgorod, Russian Federation
✉ grand_982@mail.ru

Abstract: Two variants of mathematical models of rock displacement in an axisymmetric formulation are considered for the forecast assessment of the consequences of underground mining. For a homogeneous, isotropic, linearly deformable array, their solutions are obtained by the integral Hankel transformation. The given examples show the possibilities of modeling, what results can be obtained and in what form they are presented. The change of the subsidence trough during the development of mining operations is shown. Graphs of subsidence, horizontal displacements, and deformations used for the control of rock displacement are constructed. The effect of changes in the mechanical characteristics (coefficient of lateral expansion) of the array on the calculation results has been assessed. The research results may be useful in assessing the harmful impact of mining operations on surface structures and natural objects.

Keywords: underground mining, subsidence, displacement, boundary value problem, boundary conditions, Hankel transform, horizontal displacements and deformations

For citation: Grigoryev A.A., Grigoryev A.M., Zinchenko A.V., Ponomarenko K.B. The axisymmetric problem of the displacement massif a linear-deformable rock mass during the underground mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):21-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-21-25>.

Введение

Проведение горных работ вызывает деформацию расположенных на подрабатываемых территориях зданий, сооружений и природных объектов, оказывая на них различное неблагоприятное воздействие. В зависимости от горно-геологических, горнотехнических условий эти деформации находятся в пределах от едва улавливаемых высокоточными инструментальными наблюдениями до вызывающих образования на земной поверхности видимых трещин и даже провалов (рис. 1).

Поэтому нахождение параметров сдвижения и совершенствование методов их прогноза является актуальной научной и практической задачей.



Рис. 1. Возможные последствия ведения подземных горных работ (фото из открытых источников) /

Fig. 1. Possible consequences of underground mining operations (photo from open sources)

Для ее решения в работах отечественных [1–5] и зарубежных [6–10] авторов использованы разные подходы, в том числе аналитические методы механики сплошных сред. В современных нормативных документах^{1, 2, 3} также предус-

¹ СНиП П-8-78. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях. URL: <https://docs.cntd.ru/document/471806280>.

² СНиП П-8-78. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029888>.

³ СНиП П-8-78. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород. URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/11FRQ.html>.

матривается предварительный (до проведения инструментальных наблюдений) прогноз величин деформаций земной поверхности первоначально с использованием модели линейно-упругого поведения.

В связи с этим рассмотрение возможных подходов к моделированию сдвижения массива горных пород при наиболее общих предположениях представляет научную и практическую значимость.

Цель исследований: оценка параметров сдвижения (оседаний, горизонтальных смещений и деформаций) и их развитие при ведении горных работ или водопонижении.

Методы исследований. Аналитические методы механики деформируемого твердого тела.

Результаты исследований

В работах [11, 12] были рассмотрены задачи в плоской и пространственной постановке. Рассмотрим осесимметричную задачу, решение которой может быть полезно при отработке изометрических в плане залежей или в большей степени при снижении напоров в пласте при его оседании.

Постановка и решение задач

В массиве однородных и изотропных линейно-деформируемых горных пород на глубине H в результате проведения очистных работ создано выработанное пространство, имеющее в плане вид круга радиусом R и эффективной вынимаемой мощностью m (рис. 2). Требуется определить сдвижение налегающей толщи пород, то есть компоненты дополнительных перемещений подработанной толщи горных пород (перекрывающего слоя) вследствие создания выработанного пространства.

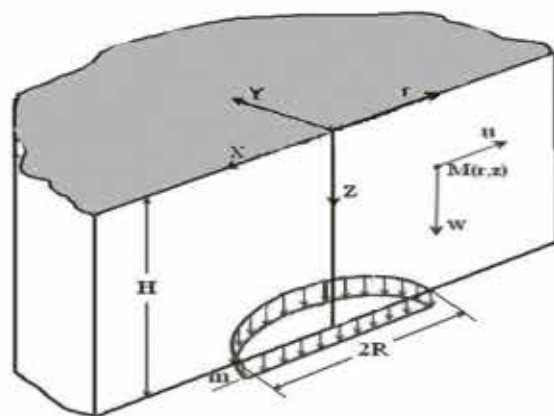


Рис. 2. Расчетная схема /
Fig. 2. Calculation scheme

Для решения поставленной задачи запишем уравнения равновесия в перемещениях (уравнения Ламе)

$$\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 w + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

$$\theta = \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \text{ – объемная деформация;}$$

ν – коэффициент Пуассона пород слоя.

На контакте перекрывающей толщи с пластом (нижней границе слоя) граничные условия задаются в виде:

– экспериментально измеренного распределения оседаний кровли пласта

$$w = m(r) \text{ при } z = H, 0 \leq r < \infty, \quad (3)$$

которые для предварительного прогноза принимаются в виде

$$m(r) = \begin{cases} m, & \text{при } 0 \leq r \leq R; \\ 0, & \text{при } r > R \end{cases} \quad (4)$$

– условия полного сцепления пород перекрывающей толщи с породами пласта (вариант 1)

$$u(r) = 0 \text{ при } z = H, 0 \leq r < \infty, \quad (5)$$

или, наоборот, их свободного проскальзывания (вариант 2)

$$\tau_{rz}(r, z) = 0 \text{ при } z = H, 0 \leq r < \infty. \quad (6)$$

Граничные условия на земной поверхности (верхней границе слоя) сводятся к отсутствию на ней нормальных и касательных напряжений, то есть

$$\sigma_{zz} = \tau_{rz} = 0 \text{ при } z = 0, 0 \leq r < \infty. \quad (7)$$

Таким образом, получаем смешанную задачу теории упругости для бесконечного (в горизонтальном направлении) слоя мощностью H .

Если ввести функцию напряжений $\Phi(r, z)$, через которую перемещения выражаются соотношениями

$$u = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z}, \quad (8)$$

$$w = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{\partial \Phi}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right], \quad (9)$$

то задача сводится к решению бигармонического уравнения в цилиндрических координатах

$$\nabla^2 (\nabla^2 \Phi) = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2 \Phi(r, z) = 0, \quad (10)$$

которое получается при подстановке (8), (9) в уравнение равновесия (2), поскольку уравнение (1) при этом удовлетворяется тождественно.

Для решения задачи использовано интегральное преобразование Ханкеля, которое для функции напряжений $\Phi(r, z)$ определяется соотношением

$$\overline{\Phi}(\xi, z) = \int_0^\infty \Phi(r, z) J_0(\xi r) r dr, \quad 0 \leq \xi < \infty, \quad (11)$$

где $J_0(\xi r)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, и обратным преобразованием (формулой обращения Ханкеля)

$$\Phi(r, z) = \int_0^\infty \overline{\Phi}(\xi, z) J_0(\xi r) \xi d\xi, \quad 0 \leq r < \infty. \quad (12)$$

Выполняя преобразование Ханкеля бигармонического уравнения (10) и интегрируя по частям, получим, что трансформанта $\overline{\Phi}(\xi, z)$ функции напряжений $\Phi(r, z)$ удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению четвертого порядка

$$\frac{d^4 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^4} - 2\xi^2 \frac{d^2 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^2} + \xi^4 \overline{\Phi}(\xi, z) = 0. \quad (13)$$

Граничные условия (3) – (7) примут вид на верхней границе слоя при $z = 0$

$$\left[\nu \frac{d^2 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^2} + (1-\nu) \xi^2 \overline{\Phi}(\xi, z) \right]_{z=0} = 0, \quad (14)$$

$$\left[(1-\nu) \frac{d^3 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^3} - (2-\nu) \xi^2 \frac{d \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz} \right]_{z=0} = 0, \quad (15)$$

а на нижней границе (при $z = H$)

$$\left[(1-2\nu) \frac{d^2 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^2} - 2(1-\nu) \xi^2 \overline{\Phi}(\xi, z) \right]_{z=H} = \overline{m}(\xi), \quad (16)$$

условие полного сцепления

$$\left. \frac{d \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz} \right|_{z=H} = 0 \quad (17)$$

или проскальзывания

$$\left[\nu \frac{d^2 \overline{\Phi}(\xi, z)}{dz^2} + (1-\nu) \xi^2 \overline{\Phi}(\xi, z) \right]_{z=H} = 0. \quad (18)$$

Таким образом, получаем два варианта краевых задач.

В случае простейшей формы (4) распределения оседаний по почве слоя

$$\overline{m}(\xi) = \int_0^\infty m(r) J_0(\xi r) r dr = \int_0^R m J_0(\xi r) r dr = \frac{m R J_1(\xi R)}{\xi}, \quad (19)$$

и, опуская промежуточные выкладки, решение для полного сцепления пород перекрывающей толщи с породами отрабатываемого пласта (вариант 1) приводится к виду

$$u(r, z) = m \int_0^\infty \left\{ \frac{(1-2\nu)[2(1-\nu)ch\xi H + \xi Hsh\xi H] - [(1-2\nu)sh\xi H + \xi Hch\xi H]\xi z}{(3-4\nu)sh^2(\xi H) + \xi^2 H^2 + 4(1-\nu)^2} sh\xi z - \right. \\ \left. - \frac{2(1-\nu)[(1-2\nu)sh\xi H + \xi Hch\xi H] - [2(1-\nu)ch\xi H + \xi Hsh\xi H]\xi z}{(3-4\nu)sh^2(\xi H) + \xi^2 H^2 + 4(1-\nu)^2} ch\xi z \right\} R J_1(\xi R) J_1(\xi r) d\xi \quad (20)$$

$$w(r, z) = m \int_0^{\infty} \left\{ \frac{(1-2\nu)[(1-2\nu)sh\xi H + \xi Hch\xi H] + [\xi Hsh\xi H + 2(1-\nu)ch\xi H]\xi z}{(3-4\nu)sh^2(\xi H) + \xi^2 H^2 + 4(1-\nu)^2} sh\xi z + \right. \\ \left. + \frac{2(1-\nu)[\xi Hsh\xi H + 2(1-\nu)ch\xi H] + [(1-2\nu)sh\xi H + \xi Hch\xi H]\xi z}{(3-4\nu)sh^2(\xi H) + \xi^2 H^2 + 4(1-\nu)^2} ch\xi z \right\} RJ_1(\xi R) J_0(\xi r) d\xi \quad (21)$$

В случае проскальзывания почвы перекрывающего слоя по кровле отрабатываемого пласта решение будет иметь вид (вариант 2)

$$u(r, z) = m \int_0^{\infty} \left\{ \frac{(1-2\nu)[sh\xi H + \xi Hch\xi H] - [\xi Hsh\xi H]\xi z}{(1-\nu)[sh(2\xi H) + 2\xi H]} sh\xi z - \right. \\ \left. - \frac{2(1-\nu)[\xi Hsh\xi H] - [sh\xi H + \xi Hch\xi H]\xi z}{(1-\nu)[sh(2\xi H) + 2\xi H]} ch\xi z \right\} RJ_1(\xi R) J_1(\xi r) d\xi \quad (22)$$

$$w(r, z) = m \int_0^{\infty} \left\{ \frac{(1-2\nu)[\xi Hsh\xi H] + [sh\xi H + \xi Hch\xi H]\xi z}{(1-\nu)[sh(2\xi H) + 2\xi H]} sh\xi z + \right. \\ \left. + \frac{2(1-\nu)[sh\xi H + \xi Hch\xi H] + [\xi Hsh\xi H]\xi z}{(1-\nu)[sh(2\xi H) + 2\xi H]} ch\xi z \right\} RJ_1(\xi R) J_0(\xi r) d\xi \quad (23)$$

Примеры расчетов

Результаты расчетов оседаний земной поверхности η и ее радиальных смещений ξ , которые непосредственно измеряются при маркшейдерских наблюдениях, показаны на рисунках 3 и 4 (см. цв. вклейку на стр. 35), при $H = 400$ м; $R = 100, 200, 300, 400$ м; $\nu = 0,25$ в долях эффективной мощности m .

Из особенностей полученных кривых можно отметить, что их вид инвариантен относительно масштаба, то есть зависит только от соотношения R и H . При проскальзывании почвы перекрывающего слоя по кровле отрабатываемого пласта (2-й вариант) оседания η и горизонтальные смещения ξ не зависят от деформационных свойств налегающей толщи (коэффициента поперечного расширения ν).

В случае сцепления (1-й вариант) изменение кривых при $R = H = 400$ показано на рисунке 5 (см. цв. вклейку на стр. 36). Также можно отметить, что в случае проскальзывания (2-й вариант) величины смещений больше, чем при сцеплении.

Для оценки интенсивности техногенного воздействия горных работ на природные объекты, здания, сооружения и объекты инженерной инфраструктуры большое значение имеет прогноз горизонтальных деформаций, приведенный на рисунке 6 (см. цв. вклейку на стр. 36).

При оценке сдвижений и деформаций земной поверхности под влиянием водопонижения и дренажных работ следует иметь в виду, что процесс водопонижения носит временной характер, может развиваться на протяжении нескольких лет и связан с календарным графиком его проведения. Величины R при этом достаточно большие.

Результаты расчетов показаны на рисунках 7 и 8 (см. цв. вклейку на стр. 37).

При необходимости могут быть вычислены наклоны и кривизна.

Заключение

1. Полученные аналитические решения позволяют оценить параметры сдвижения при осевой симметрии задачи, которая выполняется при разработке изометрических в пла-

не залежей или в большей степени при снижении напоров в пласте при его осушении.

2. Полученные решения и графики позволяют рассчитывать вертикальные и горизонтальные компоненты смещений горных пород и все виды деформаций массива в зоне прогиба пород без разрыва сплошности (в «упругой» зоне) и особенно удобны, если горные работы проводятся с полной закладкой выработанного пространства, когда зона беспорядочного обрушения и зона разломов и крупных трещин, как правило, отсутствуют. Входящая в расчетные соотношения величина эффективной мощности m определяется свойствами закладки или пород осушаемого пласта и вычисляется на основе экспериментов (например, для условий Яковлевского ГОКа m составляет около 5 % выемочной мощности).

3. Для оценки отклонения свойств реального породного массива от идеализированных свойств, принимаемых при расчете, целесообразно использовать интервальные оценки для изучения влияния каждого из параметров.

4. Таким образом, приведенный экспериментально-аналитический подход к прогнозу и описанию процесса сдвижения позволяет обеспечить геомеханический мониторинг разработки месторождений: выполнять необходимые варианты расчеты и принимать оптимальные решения по проектированию подземных сооружений и ведению горных работ; формулировать требования к инструментальному контролю и проводить обратные расчеты при наличии натурных измерений.

Выводы

1. В статье приведены результаты математического моделирования сдвижения при ведении горных работ или водопонижении. Полученные соотношения и их графики позволяют прогнозировать оседания, горизонтальные смещения, деформации и их изменения еще на стадии планирования горных работ.

2. Результаты исследований могут быть полезными при проектировании и разработке месторождений для оценки вредного воздействия горных работ на наземные сооружения и природные объекты и разработке необходимых мер по обеспечению их безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахурин И.М. Сдвигение горных пород под влиянием горных разработок. Ленинград – Москва, 1946: 231.
Bakhrin I.M. Displacement of rocks under the influence of mining operations. Leningrad – Moscow, 1946: 231. (In Russ.).
2. Авершин С.Г. Сдвигение горных пород при подземных разработках. Москва, 1947: 245.
Avershin S.G. Displacement of rocks during underground mining. Moscow, 1947: 245. (In Russ.).
3. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках, под общ. ред. В.А. Букринского, Г.В. Орлова. Москва, 1984: 241.
Displacement of rocks and the earth's surface during underground mining, edited by V.A. Bukrinsky, G.V. Orlov. Moscow, 1984: 241. (In Russ.).
4. Кузнецов М.А., Акимов Л.Г., Кузьмин В.И. и др. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях. Москва, 1979: 226.
Kuznetsov M.A., Akimov L.G., Kuzmin V.I., et al. Displacement of rocks at ore deposits. Moscow, 1979: 226. (In Russ.).
5. Викторов С.Д., Гончаров С.А., Иофис М.А. и др. Механика сдвижения и разрушения горных пород. Москва, 2019: 360.
Viktorov S.D., Goncharov S.A., Iofis M.A., et al. Mechanics of rock displacement and fracture, ed. by academician K.N. Trubetskoy. Moscow, 2019: 360. (In Russ.).
6. Будрык В., Литвинишин Е., Кнотте С. и др. Вопросы расчета сдвижений поверхности под влиянием горных разработок. Москва, 1956: 65.
Budryk V., Litvinishin E., Knotte S., et al. Issues of calculating surface displacements under the influence of mining operations. Moscow, 1956: 65. (In Russ.).
7. Kratzsch H. Mining Subsidence Engineering. Berlin, 1983: 551.
8. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for underground mining. 3rd Ed. Berlin, 2005: 628.
9. Cui Z. Land Subsidence Induced by the Engineering-Environmental Effect. Berlin, 2018: 234.
10. Surface Subsidence Engineering: Theory and Practice. Edited by Syd S. Peng. Boca Raton, 2020: 216.
11. Григорьев А.А., Григорьев А.М. Моделирование сдвижения массива горных пород как линейно-деформируемой среды. *Вектор ГеоНаук*. 2020; 3 (3): 19-26.
Grigoriev A.A., Grigoriev A.M. Modeling of rock mass displacement as a linearly deformable medium. *Vector GeoSciences*. 2020; 3 (3): 19-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2020-10027>.
12. Григорьев А.А., Григорьев А.М. Математическое моделирование сдвижения горных пород при подземной разработке месторождений горизонтальными выработками. *Вектор ГеоНаук*. 2024; 7 (2): 45-56.
Grigoriev A.A., Grigoriev A.M. Mathematical modeling of rock displacement during underground mining of deposits by horizontal workings. *Vector GeoSciences*. 2024; 7 (2): 45-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2619-0761-2024-2-45-56>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Александрович Григорьев –
младший научный сотрудник лаборатории горного давления
и сдвижения горных пород ОАО «ВЮГЕМ», 308007,
г. Белгород, Российская Федерация;
e-mail: grand_982@mail.ru

Александр Михайлович Григорьев –
кандидат технических наук, доцент, консультант
лаборатории горного давления и сдвижения горных
пород ОАО «ВЮГЕМ», 308007, г. Белгород, Российская
Федерация

Алексей Владимирович Зинченко –
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории горного давления и сдвижения горных
пород ОАО «ВЮГЕМ», 308007, г. Белгород, Российская
Федерация

Константин Борисович Пономаренко –
младший научный сотрудник лаборатории горного давления
и сдвижения горных пород ОАО «ВЮГЕМ», 308007, г.
Белгород, Российская Федерация

Критерии авторства:

авторы внесли равный вклад при подготовке статьи.
Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.07.2025
Поступила после рецензирования: 09.09.2025
Принята к публикации: 23.09.2025

ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Grigoryev –
Research Fellow of Laboratory of Rock Pressure and
Displacement Rock Mass, VIOGEM, 308007, Belgorod,
Russian Federation; e-mail: grand_982@mail.ru

Aleksandr M. Grigoryev –
Cand. Sci. (Eng.), Docent, Consultant of Laboratory of Rock
Pressure and Displacement Rock Mass, VIOGEM, 308007,
Belgorod, Russian Federation

Alexey V. Zinchenko –
Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientist of Laboratory of Rock
Pressure and Displacement Rock Mass, VIOGEM, 308007,
Belgorod, Russian Federation

Konstantin B. Ponomarenko –
Research Fellow of Laboratory of Rock Pressure and
Displacement Rock Mass, VIOGEM, 308007, Belgorod, Russian
Federation

Contribution:

The authors have made an equal contribution to the preparation
of the article. Conflict of interest: There is no conflict of interest.

Article info

Received: 22.07.2025
Revised: 09.09.2025
Accepted: 23.09.2025

Повышение эффективности буровзрывных работ при проходке горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты

В. Ф. Гутник^{1✉}, А. Н. Анушенков², С. А. Вохмин², Н. В. Пархоменко¹

¹АО «БАМТОННЕЛЬСТРОЙ-ТРЕСТ» «Строительство Дуссе-Алинского тоннеля Дальневосточной железной дороги», г. Москва, Российская Федерация

²Институт цветных металлов Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация
✉ Gutnik.vf@yandex.ru

Аннотация: При строительстве автодорожных и железнодорожных тоннелей одним из важнейших показателей, определяющих себестоимость проекта, является скорость проходки. На скорость, в свою очередь, влияет множество факторов как технологических, так и организационных: способ проходки, производительность и техническое состояние горно-шахтного оборудования, четкая организация цикличности выполняемых работ, профессионализм коллектива. В данной статье рассмотрена возможность повышения скорости проходки при горном способе ведения работ с применением буровзрывного метода за счет увеличения длины заходки в одном цикле работ и приведения коэффициента использования шпура (КИШ) к требуемым показателям. При строительстве железнодорожного тоннеля в период проходки в условиях многолетней мерзлоты проведены испытания различных схем взрывания забоя путем корректировки параметров паспорта буровзрывных работ (БВР) в зависимости от горно-геологических и горнотехнических характеристик забоя и результатов предыдущих взрывов. Приведены данные по каждому комплексу пробных циклов БВР, показан весь путь достижения положительного результата. По итогам проделанной работы определена оптимальная схема вруба и паспорта БВР, позволяющая обеспечить максимальную скорость проходки калотты при наименьших затратах.

Ключевые слова: тоннель, проходка, калотта, многолетняя мерзлота, паспорт буровзрывных работ, коэффициент использования шпура

Для цитирования: Гутник В. Ф., Анушенков А. Н., Вохмин С. А., Пархоменко Н. В. Повышение эффективности буровзрывных работ при проходке горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):26-34. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-26-34>.

Increasing the efficiency of drilling and blasting operations in driving large cross-section mining in permafrost conditions

V. F. Gutnik^{1✉}, A. N. Anushenkov², S. A. Vokhmin², N. V. Parkhomenko¹

¹JSC BAMTONNELSTROY-TREST "Construction of the Dusse-Alin Tunnel of the Far Eastern Railway", Moscow, Russian Federation

²Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ Gutnik.vf@yandex.ru

Abstract: During construction of road and railway tunnels, one of the most important indicators determining the cost of the project is the speed of excavation. The speed, in turn, is affected by many factors, both technological and organizational: the method of excavation, the productivity and technical condition of the mining equipment, the clear organization of the cyclicity of the work performed, the professionalism of the team. This article considers the possibility of increasing the speed of excavation, with the mining method of conducting work using the drilling and blasting method by increasing the length of the entry in one cycle of work and bringing the coefficient of utilization of the borehole (CUB) to the required indicators. During the construction

of a railway tunnel, during the excavation period in permafrost conditions, tests were carried out on various face blasting schemes by adjusting the parameters of the drilling and blasting work (BW) passport, depending on the mining and geological and mining technical characteristics of the face and the results of previous blasts. The data for each set of trial cycles of the drilling and blasting operation are presented, the entire path to achieving a positive result is shown. Based on the results of the work done, the optimal cutting scheme and the drilling and blasting operation passports were determined, allowing for the maximum speed of penetration of the calotte at the lowest cost.

Keywords: excavation, tunnel, calotte, permafrost, blasting operation passports, coefficient of utilization of the borehole

For citation: Gutnik V.F., Anushenkov A.N., Vokhmin S.A., Parkhomenko N.V. Increasing the efficiency of drilling and blasting operations in driving large cross-section mining in permafrost conditions. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):00-00. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-26-34>.

Введение

Одной из специфических особенностей строительства тоннелей является неравномерность получения выручки в пределах срока реализации проекта [1]. Условно можно выделить три основных этапа [2]: подготовительный, основной и заключительный.

На подготовительном этапе проект требует значительных вложений денежных средств, необходимых для обустройства промышленной площадки и вахтового городка ввиду удаленности объекта строительства от населенных пунктов. При этом себестоимость производимых работ выше стоимости строительно-монтажных работ (СМР), которая предьявляется к оплате.

На основном этапе ведется проходка тоннеля, которая приносит максимальную выручку и при правильном планировании и организации производственного процесса обеспечивает прибыль по проекту в целом. Постоянное обустройство тоннеля также является прибыльным, но в меньшей степени, чем проходка.

Заключительный этап, где происходит демонтаж временных зданий и сооружений (ВЗиС), их передислокация и рекультивация территории строительства, является убыточным.

Таким образом, основным параметром получения максимальной прибыли является эффективность ведения горно-проходческих работ (ГПР). Повысить эффективность ГПР можно за счет роста доходной части путем увеличения скорости проходки, которая в свою очередь снижает расходную часть за счет сокращения сроков строительства.

Так как проходка тоннеля является циклическим видом работ [3], то увеличить ее скорость можно за счет двух факторов:

Оптимизация цикла за счет снижения времени выполнения каждой отдельной операции и параллельного (одновременного) выполнения нескольких операций, что в итоге приведет к сокращению времени всего цикла работ. Данный фактор является организационным и зависит, по сути, от четкой и слаженной работы коллектива.

Увеличение длины разрабатываемой заходки. Это качественное изменение производительности, которое увеличивает время отдельного цикла за счет большего объема основных операций, но за отчетный период (месяц) увеличивает скорость проходки за счет продвижения забоя на большую глубину в каждом цикле работ. Применение данного фактора возможно только при горном способе¹ проходки [4], так как при механизированном способе с помощью тоннелепроход-

ческих комплексов (ТПК) длина заходки ограничена длиной кольца постоянной обделки.

В рассматриваемом примере наибольшая длина заходки была определена проектом и составляла 2 п. м, что было обусловлено использованием максимального количества взрывчатых веществ (ВВ) при минимальном воздействии на действующий тоннель. При этом такая длина заходки не обеспечивала необходимую скорость проходки, хотя организационная составляющая была отработана на высоком уровне. После проведения горно-экологического мониторинга по различным методикам [5–8] от проектного института было получено разрешение на увеличение длины заходки.

Корректировки паспорта БВР, по известным^{2, 3, 4, 5} методикам [9], не приносили положительного результата: при увеличении длины шпуров КИШ был низким (0,6–0,7), соответственно, оставались глубокие стаканы, увеличился расход ВВ, увеличилось время бурения (а по сути, перебуривание обуренного ранее участка), результат был неудовлетворительным.

Возникла необходимость в разработке схемы БВР [10–12], которая позволит эффективно вести проходку при меняющихся горно-геологических характеристиках забоя в условиях многолетней мерзлоты [13].

Цель исследований: разработка оптимальной схемы буровзрывных работ, которая позволит эффективно вести проходку выработок большого сечения в условиях многолетних мерзлых пород, сочетая в себе оптимальную длину заходки и удовлетворительное значение КИШ.

Объект исследований

Тоннель имеет односкатный профиль с уклонами $i = 15,1\%$ и $i = 7,6\%$. В плане на участке длиной 323 м тоннель расположен на кривой радиусом 500 м, далее на всем протяжении расположен на прямом участке пути. Поперечное сечение тоннеля имеет подковообразную форму. Площадь поперечного сечения в черне на прямом участке составляет 69 м², на криволинейном участке – 72 м².

Грунты на уровне заложения тоннеля находятся в многолетнем мерзлом состоянии, температура которых колеблется

¹ СТО НОСТРОЙ 2.27.19-2011. Издание официальное. М., 2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200090839>.

² Патент РФ № 2081392 С1, опублик. 10.06.1997 г. Андриевский А. П. Способ образования врубной полости.

³ Патент РФ 146195 U1, опублик., 10.10.2014 г. Масаев Ю. А., Стафеев А. А. Комбинированный призматический вруб.

⁴ Патент РФ 2646152 С2, опублик. 01.03.2018 г., Масаев Ю. А., Копытов А. И., Масаев В. Ю. Схема взрывной отбойки забоя удароопасных горных пород.

в пределах от $-1,1$ до $-1,7$ °С. На основании инженерно-геологических изысканий понятно, что грунтовые воды на забое отсутствуют ввиду мерзлого состояния грунтового массива. Порода по тоннелю практически безводна, возможны отдельные водопритоки в виде каплеж при обогреве воздуха во время проходки.

В основном породы представлены гранитами крупно- и мелкозернистыми, реже – среднезернистыми, слабыветрелыми, прочными, от неразмываемых до размываемых. Порода трещиноватая – устойчивая. Группа грунта по ГЭСН-2001 – 8. Коэффициент крепости по шкале профессора М. М. Протодаконова $f = 7$. Встречаются участки в основании тоннеля с группой грунтов по ГЭСН-2001 – 9, коэффициентом крепости по шкале профессора М. М. Протодаконова $f = 12,1$. Интервал осложнен пятью зонами повышенной трещиноватости с углами падения трещин – $64-72^\circ$. В пределах зон граниты сильноветрелые, сильнотрещиноватые, низкой прочности, раздробленные до дресвы и щебня, с прослоями очень низкой прочности, малопрочных, средней прочности и прочных. Группа грунта по ГЭСН-2001 – 4. Коэффициент крепости по шкале профессора М. М. Протодаконова $f = 1,3$.

В зависимости от инженерно-геологических, горно-технических условий проходка тоннеля осуществляется буровзрывным способом с разработкой грунта в забое как на полное сечение, так и уступным способом с раздельным взрыванием опережающей верхней части тоннеля – калотты и последующей нижней части тоннеля – штрассы. Взрывные работы ведутся заходками $L_{\text{зх}} = 2,0$ м, по типовым паспортам БВР, разработанным в составе утвержденного в установленном порядке проекта буровзрывных работ.

Методика исследования

Принцип исследования заключается в последовательной корректировке различных параметров паспорта БВР при проходке тоннеля: конструкции вруба [14], длины шпуров, изменения количества и диаметра разгрузочных шпуров и скважин, применения различных типов ВВ, изменения серийности короткозамедленного взрывания (КЗВ). Основной упор сделан на конструкцию вруба, так как именно от глубины образования первоначальной врубовой полости зависит работа отбойных и оконтуривающих шпуров.

На каждую корректировку паспорта БВР [15, 16] было проведено 5–7 пробных взрывов для получения достоверных результатов.

Результаты исследований

Экспериментальные испытания

Первоначальный паспорт БВР включал в себя прямой вруб (рис. 1, 2), состоящий из 13 шпуров диаметром 43 мм (I), пробуренных перпендикулярно плоскости забоя на глубину 2 200 мм, и 2 разгрузочных незаряжаемых скважин диаметром 76 мм (II), пробуренных перпендикулярно плоскости забоя на глубину 2 300 мм, в центральной части вруба по вертикальной оси между шпурами 1–3.

Цифрами от 1 до 13 обозначены порядковые номера шпуров. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовался патронированный аммонит № 6 ЖВ. Плотность аммонита –

$1,0-1,2$ г/см³, диаметр патрона – 31 мм, масса аммонита в патроне – 200 г. Марка детонатора – «Искра-Ш». При КИШ = 0,85–0,9 габариты врубовой полости, при соотношении сторон высота (H), ширина (B), длина (L) составляют 1340 : 1340 : 1870–1980 мм соответственно.

Цикл работ при данном типе вруба – 24 часа.

Средняя скорость проходки калотты в месяц составляла

$$30 \times ((1,87 + 1,98) / 2) = 57,75 \text{ п. м.}$$

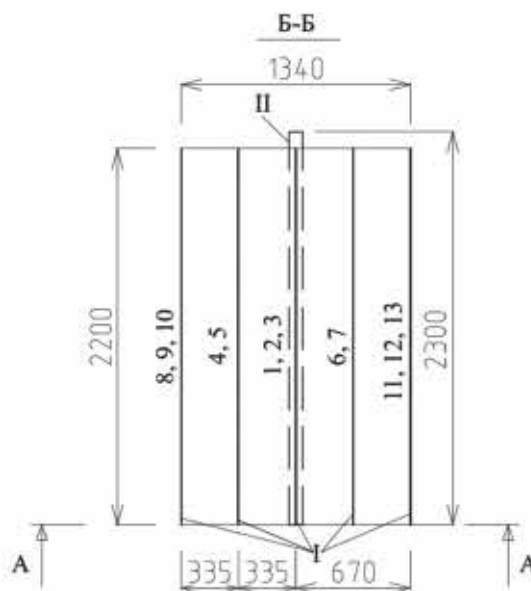


Рис. 1. Продольный разрез по шпурам /
Fig. 1. Longitudinal section along the boreholes

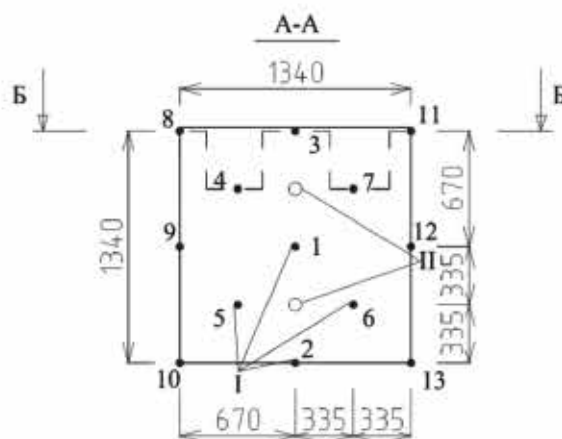


Рис. 2. Поперечный разрез по шпурам /
Fig. 2. Cross-section along the boreholes

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 1.

Результаты пробных взрывов представлены в таблице 2.

Далее была предпринята попытка увеличить длину заходки за счет применения шпуров глубиной 3 200 мм, а разгрузочных незаряжаемых скважин – 3 300 мм, без других изменений схемы вруба (рис. 1, 2). При КИШ = 0,85–0,9 габариты врубовой полости, при соотношении сторон высота (H), ширина (B), длина (L) составляют 1340 : 1340 : 2720–2880 мм соответственно.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Очередность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					на шпур	на серию
1	1	0	1	2 200	1,6	1,6
2	2,3	100	2	2 200	1,6	3,2
3	4, 5, 6, 7	200	4	2 200	1,4	5,6
4	8, 9, 10, 11, 12, 13	300	6	2 200	1,2	7,2
Итого расход ВВ, кг		На 1 п. м – 9,14		На 1 м³ – 5,09	Всего 17,6	

Таблица 2 / Table 2

Результаты пробных взрывов /
Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина уходки, мм	Козфф. крепости породы по шкале М. М. Протодяконова, f
1	0,9	1 980	7,8
2	0,87	1 914	7,8
3	0,89	1 958	7,8
4	0,85	1 870	7,8
5	0,88	1 936	7,8

Данная попытка не принесла положительных результатов, КИШ оказался низким: в пределах 0,6–0,7. Соответственно, произошел перерасход ВВ в пределах 20–25 %, было затрачено время на перебуривание ранее взорванного участка породного массива. Также затрачено дополнительное время на оборку заголов по забою из-за образования трещиноватости и бурения впереди лежащих скальных пород. После пяти пробных взрывов предпринята попытка улучшить КИШ путем увеличения диаметра разгрузочных скважин до 110 мм, но никакого положительного эффекта это не принесло: КИШ остался прежним. После этого данный тип вруба больше не использовался.

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 3.

Результаты пробных взрывов представлены в таблице 4.

Следующая корректировка была направлена на сочетание прямого и клинового вруба, а также на увеличение объема врубовой полости по ширине (В) и высоте (Н) с добавлением одной разгрузочной скважины, выполняющей роль дополнительной обнаженной поверхности в системе вруба (рис. 3, 4).

Таблица 3 / Table 3

Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Очередность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					на шпур	на серию
1	1	0	1	3 200	2,4	2,4
2	2, 3	100	2	3 200	2,4	4,8
3	4, 5, 6, 7	200	4	3 200	2,2	8,8
4	8, 9, 10, 11, 12, 13	300	6	3 200	1,8	10,8
Итого расход ВВ, кг		На 1 п. м – 9,57		На 1 м³ – 5,61	Всего 26,8	

Таблица 4 / Table 4

Результаты пробных взрывов / Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина уходки, мм	Козфф. крепости породы по шкале М. М. Протодяконова, f
1	0,61	1 952	7,8
2	0,68	2 176	7,8
3	0,62	1 984	7,8
4	0,64	2 048	7,8
5	0,69	2 208	7,8

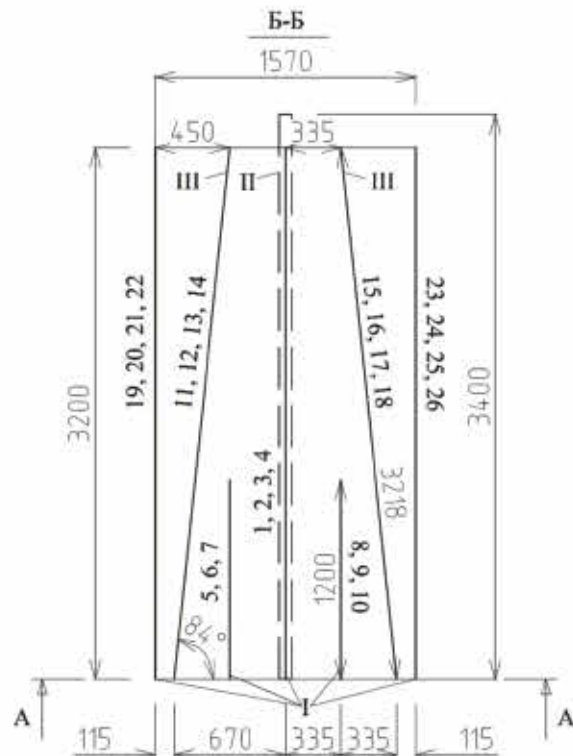


Рис. 3. Продольный разрез по шпурам /
Fig. 3. Longitudinal section along the boreholes

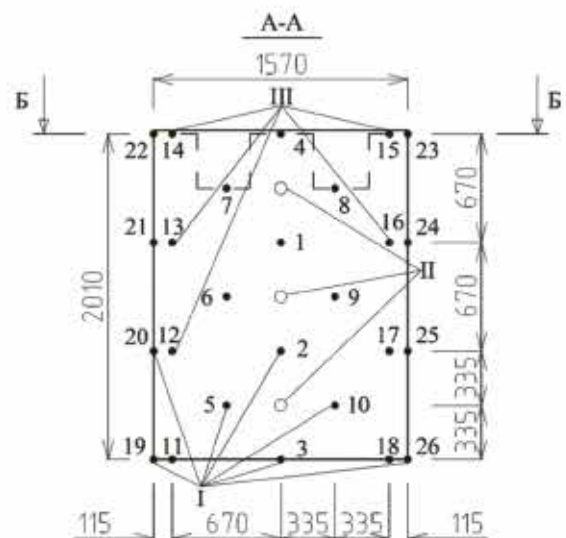


Рис. 4. Поперечный разрез по шпурам /
Fig. 4. Cross-section along the boreholes

Данная схема состоит из 18 шпуров прямого вруба диаметром 43 мм (I), пробуренных перпендикулярно плоскости забоя на глубину 3 200 мм, 3 разгрузочных незагружаемых скважин диаметром 89 мм (II), пробуренных

перпендикулярно плоскости забоя на глубину 3 400 мм в центральной части вруба, по вертикальной оси между шпурами 1–4, и 8 шпуров клиновидного вруба диаметром 43 мм (III), пробуренных под углом 84° к плоскости забоя. Цифрами от 1 до 26 обозначены порядковые номера шпуров. В качестве взрывчатого вещества использовался патронированный аммонит № 6 ЖВ, марка детонатора – «Искра-III».

Суть идеи заключалась в том, что на схеме (рис. 1, 2) расстояния 335 мм между устьями и забоями шпуров при длине 2 200 мм хватало, чтобы обеспечить удовлетворительный КИШ. Соответственно, на схеме (рис. 3, 4) после взрыва шпуров 1–4 происходит взрывание шпуров 5–10, которые создают в центральной части вруба полость размерами высота (H), ширина (B), длина (L) – 1340 : 670 : 1 020 мм соответственно. Оставшаяся длина целика от края образовавшейся полости до забоя шпуров клиновидного вруба (III) по нормали составляет 2 180 мм; расстояние между забоями данных шпуров и вертикальной осью вруба – 335 мм, как и на схеме (рис. 1, 2). Важным фактором, обеспечивающим эффективную работу шпуров 11–18, является то, что их клиновидное расположение создает большее усилие на отбойку породы в сторону от забоя по сравнению с прямым расположением, которое направлено больше на дробление. После взрывания оставшихся шпуров прямого вруба 19–26, эффективная работа которых обеспечена уже двумя обнаженными плоскостями, формируется окончательная полость при КИШ = 0,85–0,9, размерами высота (H), ширина (B), длина (L) – 2 010 : 1 570 : 2720–2880 мм соответственно.

При испытаниях данной схемы выяснилось, что существенное значение имеет серийность взрывания: параллельное (одновременное) взрывание симметричных групп шпуров (5, 6, 7) – (8, 9, 10); (11, 12, 13, 14) – (15, 16, 17, 18); (19, 20, 21, 22) – (23, 24, 25, 26), показывает худшие результаты по сравнению с последовательным взрыванием каждой группы шпуров.

Цикл работ при данном типе вруба составил 27 часов.

Соответственно, средняя расчетная скорость проходки калотты в месяц составляет

$$(30 \times 24 / 27) \times ((2,72 + 2,88) / 2) = 74,6 \text{ п. м.}$$

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 5.

Результаты пробных взрывов представлены в таблице 6.

Попытки увеличить длину заходки (L) еще на 500–1000 мм в данной системе вруба без изменения высоты (H) и ширины (B) не принесли положительных результатов: КИШ оказался неудовлетворительным.

Следующий шаг был направлен на увеличение длины заходки (L) с увеличением размера врубовой полости по ширине (B) путем модернизации сочетания прямого и клинового вруба (рис. 5, 6).

Данная схема включает в себя 12 шпуров прямого вруба диаметром 43 мм, состоящего из I и VI группы шпуров, и 22 шпура клиновидного вруба диаметром 43 мм, состоящего из III, IV и V группы шпуров, а также разгрузочные незаряжаемые скважины диаметром 110 мм (II), расположенные в центральной части вруба. Цифрами от 1 до 34 обозначены порядковые номера шпуров. В качестве взрывчатого веще-

ства использовался патронированный аммонит № 6 ЖВ, марка детонатора – «Искра-III». Суть идеи заключалась в уменьшении расстояния между забоями шпуров (III, IV) и (II), создающими первоначальные полости, с 335 до 200 мм для обеспечения требуемого КИШ при заданной длине заходки.

Таблица 5 / Table 5
Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Порядковый номер взрыва	№ шпура	Интервал задержки, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпура, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	1, 2	0	2	3 200	2,5	5
2	3, 4	100	2	3 200	2,5	5
3	5, 6, 7	200	3	1 200	0,9	2,7
4	8, 9, 10	300	3	1 200	0,9	2,7
5	11, 12, 13, 14	400	4	3 218	2,4	9,6
6	15, 16, 17, 18	500	4	3 218	2,4	9,6
7	19, 20, 21, 22	600	4	3 200	2,0	8
8	23, 24, 25, 26	700	4	3 200	2,0	8
Итого расход ВВ, кг		На 1 п. м – 18,07		На 1 м³ – 5,72		Всего 50,6

Таблица 6 / Table 6
Результаты пробных взрывов /
Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина уходки, мм	Кэфф. крепости породы по шкале М. М. Протодаконова, i
1	0,85	2 720	7,8
2	0,89	2 848	7,8
3	0,86	2 752	7,8
4	0,84	2 688	7,8
5	0,91	2 912	7,8
6	0,88	2 816	7,8
7	0,86	2 752	7,8

Схема работает следующим образом:

Прямой вруб состоит из шпуров с 1-го по 4-й (I), которые создают первоначальную щелевидную полость. Эти шпуры пробуриваются на всю длину заходки – 4 200 мм, перпендикулярно плоскости забоя в центральной части вруба, по вертикальной оси. Между ними пробуриваются три разгрузочные незаряжаемые скважины диаметром 110 мм (II), длиной 4 400 мм, выполняющие роль дополнительной обнаженной поверхности в системе вруба. Шпуры 1 и 2 взрываются в первую очередь, шпуры 3 и 4 – во вторую.

На расстоянии 610 мм от вертикальной оси вруба в обе стороны забуриваются три пары шпуров с 5-го по 10-й под углом 76° к плоскости забоя, длиной 2 400 мм, так, чтобы образовать малый клин (III), длина которого по нормали доходит до половины длины разрабатываемой заходки – 2 100 мм. Расстояние между забоями данных шпуров и вертикальной осью вруба составляет 200 мм. Шпуры с 5-го по 7-й взрываются в третью очередь, шпуры с 8-го по 10-й – в четвертую, образуя малую клиновидную полость.

На расстоянии 1 220 мм от вертикальной оси вруба в обе стороны забуриваются четыре пары шпуров с 11-го по 18-й

под углом 73° к плоскости забоя, длиной 4 322 мм, так, чтобы образовать второй клин (IV), длина которого по нормали достигает всей длины разрабатываемой заходки – 4 200 мм. Расстояние между забоями данных шпуров и вертикальной осью вруба составляет 200 мм. Шпуры с 11-го по 14-й взрываются в пятую очередь, шпуры с 15-го по 18-й – в шестую, образуя большую клиновидную полость.

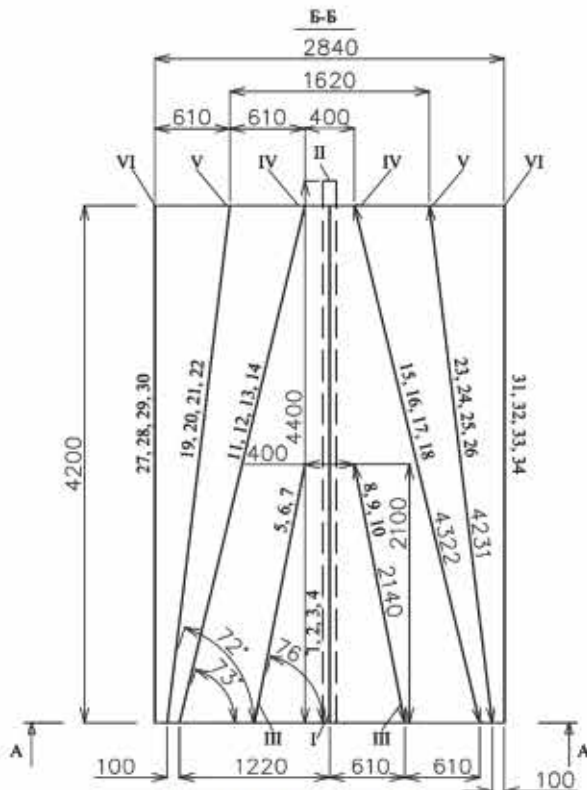


Рис. 5. Продольный разрез по шпурам /
Fig. 5. Longitudinal section along the boreholes

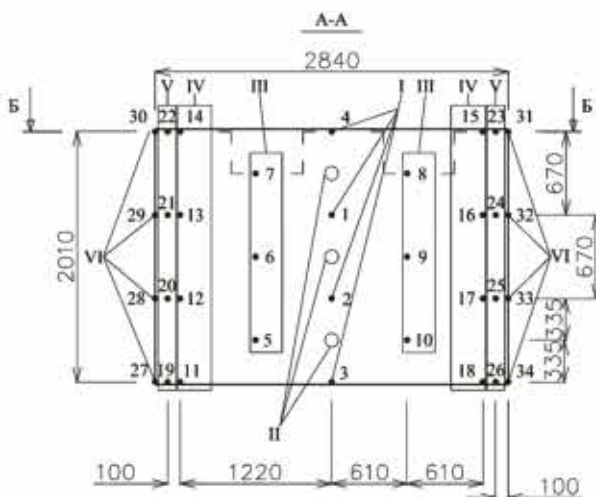


Рис. 6. Поперечный разрез по шпурам /
Fig. 6. Cross-section along the boreholes

На расстоянии 100 мм от устья группы шпуров второго клина (IV) в обе стороны забуриваются четыре пары шпуров с 19-го по 26-й под углом 72° к плоскости забоя, длиной 4 231 мм, так, чтобы образовать третий клин (V), длина которого по нормали достигает всей длины разрабатываемой заходки – 4 200 мм. Расстояние между забоями IV и V группы

шпуров составляет 610 мм. Шпуры с 19-го по 22-й взрываются в седьмую очередь, шпуры с 23-го по 26-й – в восьмую, расширяя большую клиновидную полость.

На расстоянии 100 мм от устья группы шпуров третьего клина (V) в обе стороны перпендикулярно к плоскости забоя забуриваются четыре пары шпуров с 27-го по 34-й прямого вруба длиной 4 200 мм (VI). Расстояние между забоями V и VI группы шпуров составляет 610 мм. Шпуры с 27-го по 30-й взрываются в девятую очередь, шпуры с 31-го по 34-й – в десятую, образуя конечную полость при $KIШ = 0,9-0,95$, размерами высота (H), ширина (B), длина (L) – 2 010 : 2 840 : 3780–3990 мм соответственно.

Максимальную эффективность показали интервалы замедления между сериями не менее 250 мс. Цикл работ при данном типе вруба – 29 часов.

Соответственно, средняя скорость проходки калотты в месяц составила:

$$(30 \cdot 24 / 29) \cdot ((3,78 + 3,99) / 2) = 96,4 \text{ п. м.}$$

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Очередность взрывания	№ шпура	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпура, мм	Величина заряда, кг	
					на шпур	на серию
1	1, 2	0	2	4 200	3,3	6,6
2	3, 4	250	2	4 200	3,3	6,6
3	5, 6, 7	500	3	2 140	1,6	4,8
4	8, 9, 10	750	3	2 140	1,6	4,8
5	11, 12, 13, 14	1 000	4	4 322	3,3	13,2
6	15, 16, 17, 18	1 250	4	4 322	3,3	13,2
7	19, 20, 21, 22	1 500	4	4 231	2,8	11,2
8	23, 24, 25, 26	1 750	4	4 231	2,8	11,2
9	27, 28, 29, 30	2 000	4	4 200	2,6	10,4
10	31, 32, 33, 34	2 250	4	4 200	2,6	10,4
Итого расход ВВ, кг		На 1 п. м – 23,78		На 1 м³ – 4,16		Всего 92,4

Результаты пробных взрывов представлены в таблице 8.

Таблица 8 / Table 8

Результаты пробных взрывов /
Results of test explosions

№ взрыва	КИШ	Длина усадки, мм	Козфф. крепости породы по шкале М. М. Протодаконова, f
1	0,94	3 948	7, 8
2	0,92	3 864	7, 8
3	0,95	3 990	7, 8
4	0,95	3 990	7, 8
5	0,90	3 780	7, 8
6	0,92	3 864	7, 8
7	0,93	3 906	7, 8

Также данная схема была испытана в вариантах с различным диаметром разгрузочных скважин от 76 до 125 мм с пропорциональным изменением расстояния между

устьями и забоями шпуров. За основу взято расстояние между забоями шпуров III и IV группы, которое составляет порядка 3,5 диаметра разгрузочной скважины. Соотношение сторон высота (H): ширина (B): длина (L) находится в диапазоне 1 : 1,41 : (1,66÷2,48) соответственно. КИШ при таких параметрах во время испытаний находился в диапазоне 0,9–0,95.

Итоговый результат экспериментальных испытаний

После успешных испытаний схема вруба (рис. 5, 6) в породах с коэффициентом крепости по М. М. Протодакинову, $f = 7-8$ и использованием патронированного аммонита № 6 ЖВ в качестве ВВ, марка детонатора – «Искра-III», была принята в работу.

Полный паспорт БВР на проходку калотты площадью $S = 35 \text{ м}^2$ приведен на рисунках 7 и 8 и включает в себя:

- врубовые шпуры и скважины – I (рис. 5, 6);
- отбойные шпуры – II;
- предконтурные шпуры – III;
- оконтуривающие шпуры – IV;
- разгрузочные шпуры – V, $L = 4\ 200$, выполняют роль дополнительной обнаженной поверхности, располагаются между шпурами IV группы;
- полозовые шпуры – VI, шпуры 78 и 87 забуриваются под углом 93° относительно горизонтальной и вертикальной осей тоннеля, шпуры с 79-го по 86-й забуриваются под углом 93° относительно горизонтальной оси тоннеля и 90° относительно вертикальной оси.

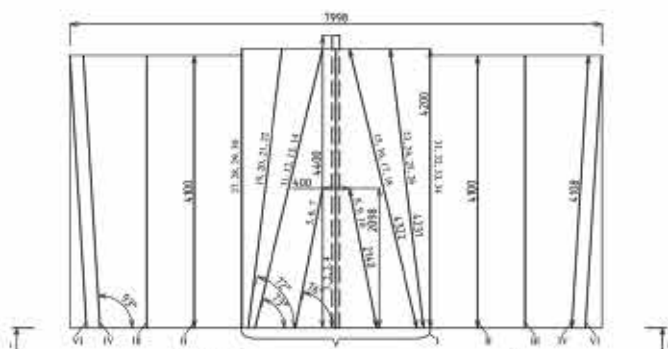


Рис. 7. Продольный разрез по шпурам /
Fig. 7. Longitudinal section along the boreholes

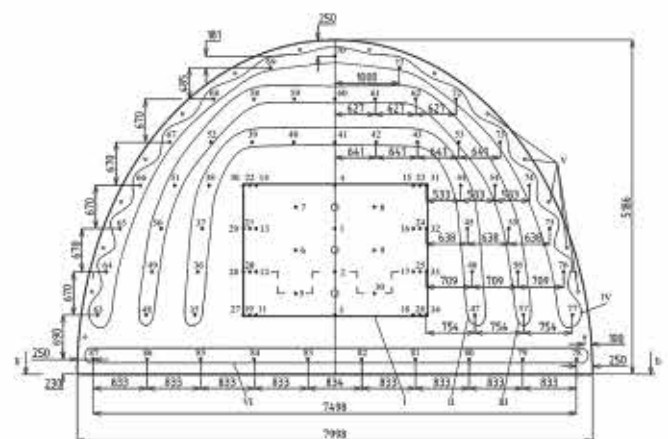


Рис. 8. Поперечный разрез по шпурам /
Fig. 8. Cross-section along the boreholes

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 9.

Таблица 9 / Table 9
Характеристики шпуровых зарядов /
Characteristics of blasthole charges

Очередность взрыва	№ шпура	Интервал заминирования, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпура, мм	Величина заряда, кг	
					на шпур	на серию
1	1, 2	0	2	4 200	3,3	6,6
2	3, 4	250	2	4 200	3,3	6,6
3	5, 6, 7	500	3	2 140	1,6	4,8
4	8, 9, 10	750	3	2 140	1,6	4,8
5	11, 12, 13, 14	1 000	4	4 322	3,3	13,2
6	15, 16, 17, 18	1 250	4	4 322	3,3	13,2
7	19, 20, 21, 22	1 500	4	4 231	2,8	11,2
8	23, 24, 25, 26	1 750	4	4 231	2,8	11,2
9	27, 28, 29, 30	2 000	4	4 200	2,6	10,4
10	31, 32, 33, 34	2 250	4	4 200	2,6	10,4
11	35, 36, 37, 38, 39, 40	2 500	6	4 100	2,3	13,8
12	41, 42, 43, 44, 45, 46, 47	3 000	7	4 100	2,3	16,1
13	48, 49, 50, 51, 52	3 500	5	4 100	2,1	10,5
14	53, 54, 55, 56, 57	4 000	5	4 100	2,1	10,5
15	58, 59, 60, 61, 62	4 500	5	4 100	2,1	10,5
16	63, 64, 65, 66, 67	5 000	5	4 108	1,6	8
17	73, 74, 75, 76, 77	6 000	5	4 108	1,6	8
18	68, 69, 70, 71, 72	7 000	5	4 108	1,6	8
19	79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86	8 000	8	4 108	1,8	14,4
20	78, 87	9 000	2	4 110	1,8	3,6
Итого расход ВВ, кг		На 1 п. м – 50,4		На 1 м³ – 1,44		Всего 195,8

Данная схема (рис. 7, 8) была применена в породах с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодакинова $f = 9-10$. При этом возникла необходимость выполнять зарядание врубовой группы шпуров (I) более мощным ВВ [17], в качестве которого был использован аммонал-200 в том же количестве – 92,4 кг (табл. 9), поскольку аммонит № 6 ЖВ при данной крепости пород перестал обеспечивать необходимый КИШ. Зарядание остальных групп шпуров (II, III, IV, VI) производилось аммонитом № 6 ЖВ согласно таблице 9. Марка детонатора – «Искра-III». КИШ при данных параметрах находился в диапазоне 0,9–0,95.

Заключение

По итогам проделанной работы была разработана оптимальная схема паспорта БВР (рис. 7, 8) для проходки калотты выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты в породах с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодакинова $f = 7-10$.

2. Данная схема позволила увеличить скорость проходки в месяц с 57,75 до 96,4 п. м. Также был снижен расход ВВ в системе вруба с 5,09 кг на 1 м³ (табл. 1) до 4,16 кг на 1 м³ (табл. 7). При этом КИШ был увеличен с 0,85–0,9 до 0,9–0,95.

3. Схема вруба (рис. 5, 6) может быть использована в широком диапазоне габаритов, которые зависят от диаметра разгрузочной скважины. Это позволяет применять данную схему при различных уровнях технической оснащенности,

наличия бурового инструмента и горно-шахтного оборудования.

Выводы

1. Приведены результаты исследований влияния различных параметров паспорта БВР на разрушение породного массива, направленных на разработку оптимальной схемы взры-

вания забоя, при проходке горизонтальных горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты.

2. Результаты исследований могут быть полезными при проходке автодорожных и железнодорожных тоннелей методом буровзрывных работ в северных регионах Российской Федерации, где породы находятся в состоянии многолетней мерзлоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Королева М.А., Кондюкова Е.С., Дайнеко Л.В. и др. Экономика строительного предприятия: учеб. пособие. Екатеринбург, 2019: 202. Koroleva M.A., Kondyukova E.S., Daineko L.V., et al. Construction Enterprise Economy: Textbook. Yekaterinburg, 2019: 202. (In Russ.).
2. Волков В.П., Наумов С.Н., Пирожкова А.Н. и др. Тоннели и метрополитены. *Транспорт*. Москва, 1975: 551. Volkov V.P., Naumov S.N., Pirozhkova A.N., et al. Tunnels and Subways. *Transport*. Moscow, 1975: 551. (In Russ.).
3. Покровский Н.М. Технология строительства подземных сооружений и шахт: Ч. 1: Технология сооружения горизонтальных горных выработок и тоннелей. Москва, 1977: 400. Pokrovsky N.M. Technology of Construction of Underground Structures and Shafts. Part 1: Technology of Construction of Horizontal Mine Workings and Tunnels. Moscow, 1977: 400. (In Russ.).
4. Эстеров Я.Х., Бродов Е.Ю., Иваняев М.И. и др. Буровзрывные работы на транспортном строительстве. *Транспорт*. Москва, 1966: 399. Esterov Ya.Kh., Brodov E.Yu., Ivanaev M.I., et al. Drilling and blasting operations in transport construction. *Transport*. Moscow, 1966: 399. (In Russ.).
5. Bao X., Zhang W., Zhao S., et al. Study on the influence of the blasting of preceding tunnel on the pre-penetration surrounding rock in succeeding tunnel with small clear distance. *Shock Vib*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5181154>.
6. Huo X., Shi X., Qiu X., et al. A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses. *Tunn. Undergr. Sp. Technol*. 2022; 123: 104407. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104407>.
7. Ji L., Zhou C., Lu S., et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a Large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting. *Rock Mech. Rock Eng*. 2021; 54: 6393-6411. <https://doi.org/10.1007/S00603-021-02630-9>.
8. Ji L., Zhou C., Lu S., et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*. 2021; 147: 104882. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104882>.
9. Кирсанов А.К., Вохмин С.А., Курчин Г.С. и др. Обзор существующих методик расчета параметров зон разрушения породного массива. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1. Kirsanov A.K., Vokhmin S.A., Kurchin G.S., et al. Review of existing methods for calculating parameters of rock mass destruction zones. *Modern problems of science and education*. 2015: 1-1. (In Russ.). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19369>.
10. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. Москва, 1980: 392. Kutuzov B.N. Blasting. Moscow, 1980: 392. (In Russ.).
11. Кутузов Б.Н., Андриевский А.П. Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. Новосибирск, 2002: 96. Kutuzov B.N., Andrievsky A.P. New Theory and New Technologies for Rock Destruction with Elongated Explosive Charges. Novosibirsk, 2002: 96. (In Russ.).
12. Кутузов Б.Н. Проектирование взрывных работ в промышленности. Москва, 1983: 359. Kutuzov B.N. Design of Blasting Operations in Industry. Moscow, 1983: 359. (In Russ.).
13. Алексеев С.И. Механика грунтов: учебное пособие для студентов вузов. Санкт-Петербург, 2007: 111. Alekseev S.I. Mechanics: A Textbook for University Students. St. Petersburg, 2007: 111. (In Russ.).
14. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. и др. Расчет конструкции прямого призматического вруба. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Kirsanov A.K., et al. Calculation of the Design of a Straight Prismatic Notch. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1. (In Russ.). URL: <http://www.science-education.ru/121-17267>.
15. Курчин Г.С., Кирсанов А.К., Грибанова Д.А. Методика расчета паспорта буровзрывных работ при проходке горизонтальных горных выработок. *Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы I Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2015 г.)*. Казань, 2015: 19-25. Kurchin G.S., Kirsanov A.K., Gribanova D.A. Methodology for calculating the passport of drilling and blasting operations when driving horizontal mine workings. *Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: Proc. I Intern. scientific conf. (Kazan, May 2015)*. Kazan, 2015: 19-25. (In Russ.). URL: <https://moluch.ru/conf/earth/archive/161/7899/>.
16. Меркулов А.В., Сильченко Ю.А., Скориков В.А. Проектирование паспортов буровзрывных работ при проходке горных выработок: учебное пособие. Новочеркасск, 2002: 70. Merkulov A.V., Silchenko Yu.A., Skorikov V.A. Design of passports of drilling and blasting operations when driving mine workings: Textbook. Novocherkassk, 2002: 70. (In Russ.).
17. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроля / Межведомственный совет по взрывному делу при Госгортехнадзоре СССР. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, 1987: 60. List of recommended industrial explosives, blasting and control devices / Interdepartmental Council on blasting under the USSR State Mining and Industrial Supervision Authority. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, 1987: 60. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вячеслав Федорович Гутник –

главный инженер обособленного подразделения АО «БАМТОННЕЛЬСТРОЙ-ТРЕСТ» «Строительство Дуссе-Алинского тоннеля Дальневосточной железной дороги», 117292, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Gutnik.vf@yandex.ru

Александр Николаевич Анушенков –

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой подземной разработки месторождений Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Сергей Антонович Вохмин –

канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой шахтного и подземного строительства Института цветных металлов Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация

Николай Васильевич Пархоменко –

начальник участка буровзрывных работ обособленного подразделения АО «БАМТОННЕЛЬСТРОЙ-ТРЕСТ» «Строительство Дуссе-Алинского тоннеля Дальневосточной железной дороги», 117292, г. Москва, Российская Федерация

Критерии авторства:

Авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.08.2025

Поступила после рецензирования: 17.09.2025

Принята к публикации: 23.09.2025

ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav F. Gutnik –

Chief Engineer of the separate division of JSC BAMTONNELSTROY-TREST "Construction of the Dusse-Alin Tunnel of the Far Eastern Railway", 117292, Moscow, Russian Federation; e-mail: Gutnik.vf@yandex.ru

Aleksandr N. Anushenkov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Underground Mining of Deposits, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Sergey A. Vokhmin –

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mine and Underground Construction, Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

Nikolay V. Parkhomenko –

Head of the Drilling and Blasting Section of the OP JSC "BTS-TREST" "Construction of the Dusse-Alin Tunnel of the Far Eastern Railway", 117292, Moscow, Russian Federation

Contribution:

The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 22.08.2025

Revised: 17.09.2025

Accepted: 23.09.2025

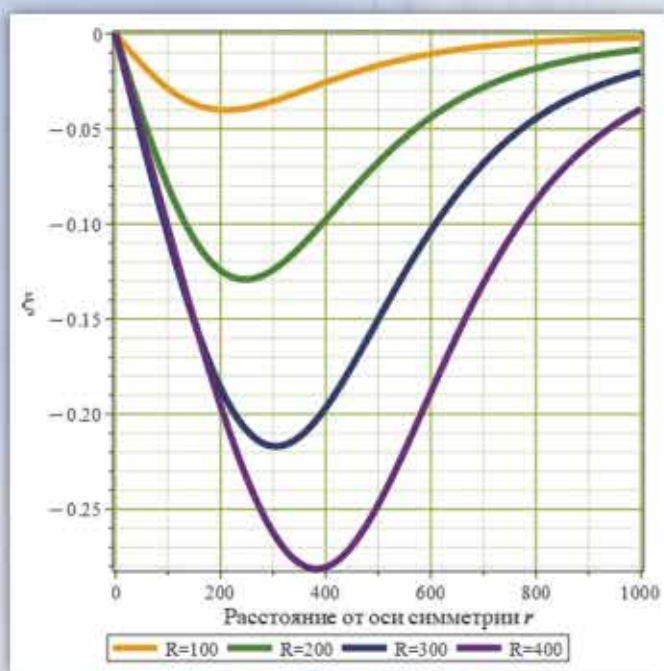
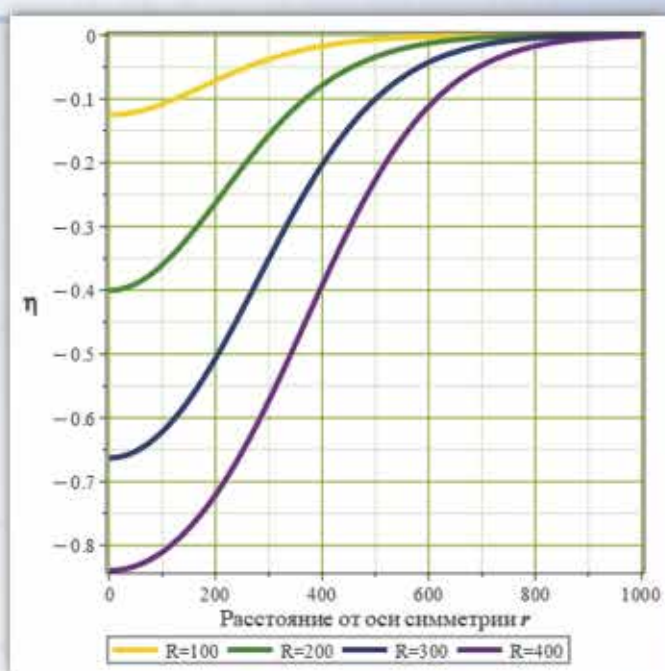


Рис. 3. Развитие оседаний η и радиальных смещений ξ земной поверхности (вариант 1) /
Fig. 3. Development of subsidence η and radial displacements ξ of the earth's surface (option 1)

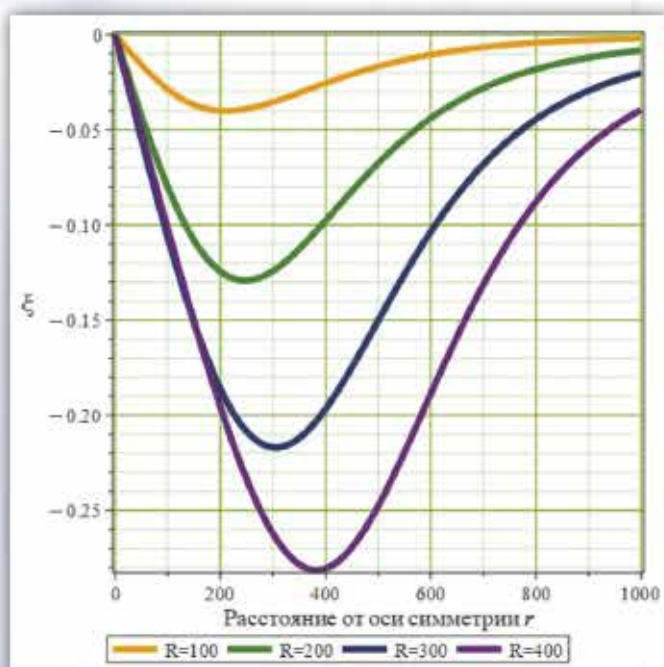
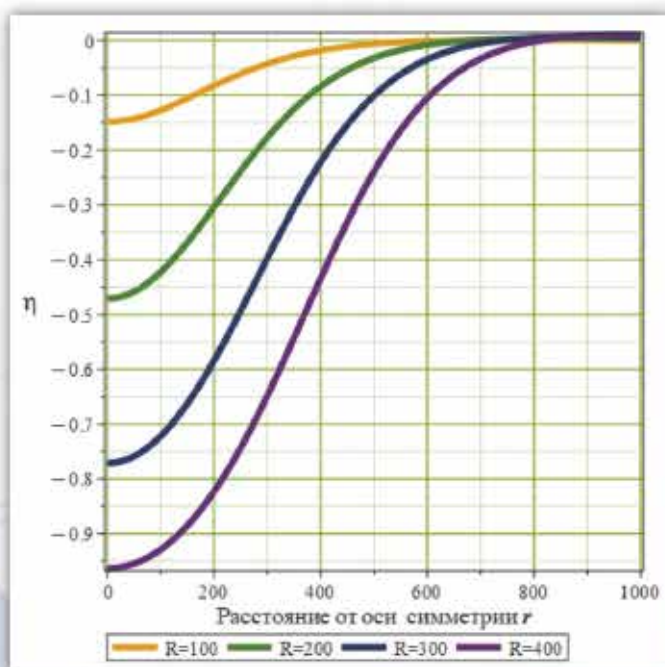


Рис. 4. Развитие оседаний η и радиальных смещений ξ земной поверхности (вариант 2) /
Fig. 4. Development of subsidence η and radial displacements ξ of the earth's surface (option 2)

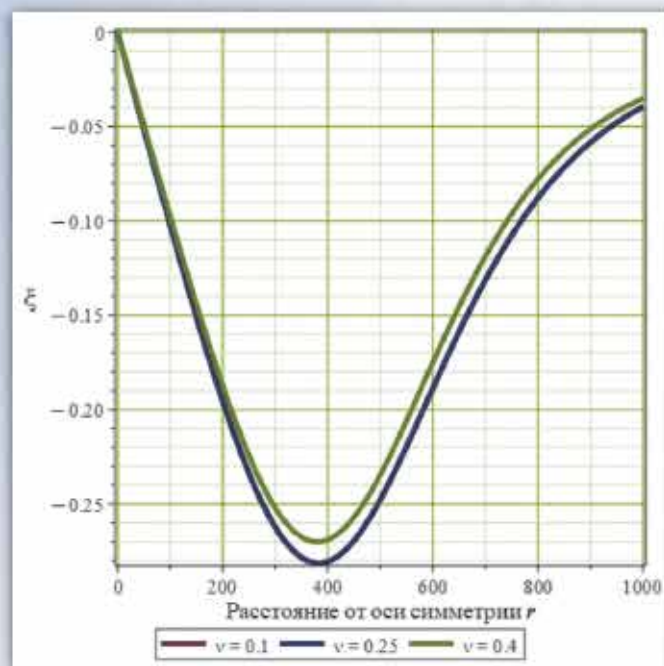
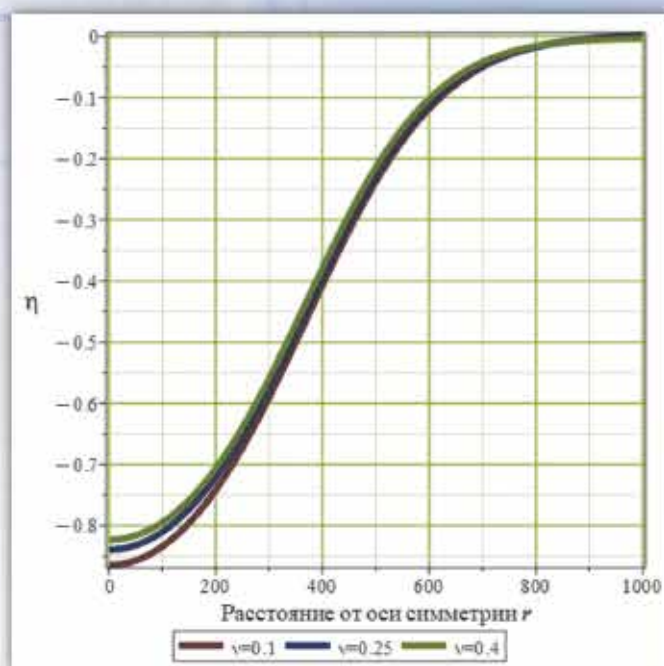


Рис. 5. Зависимость оседаний η и радиальных смещений ξ земной поверхности от коэффициента поперечного расширения ν /
Fig. 5. Dependence of subsidence η and radial displacements ξ of the earth's surface on the coefficient of transverse expansion ν

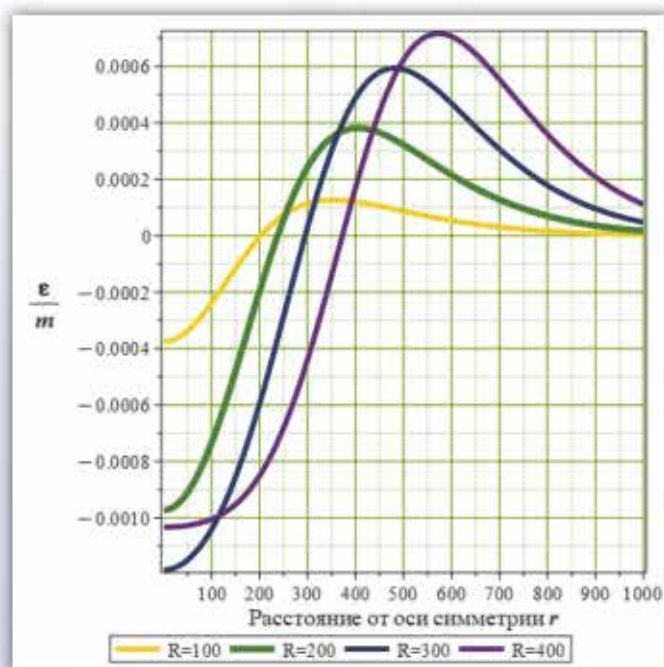
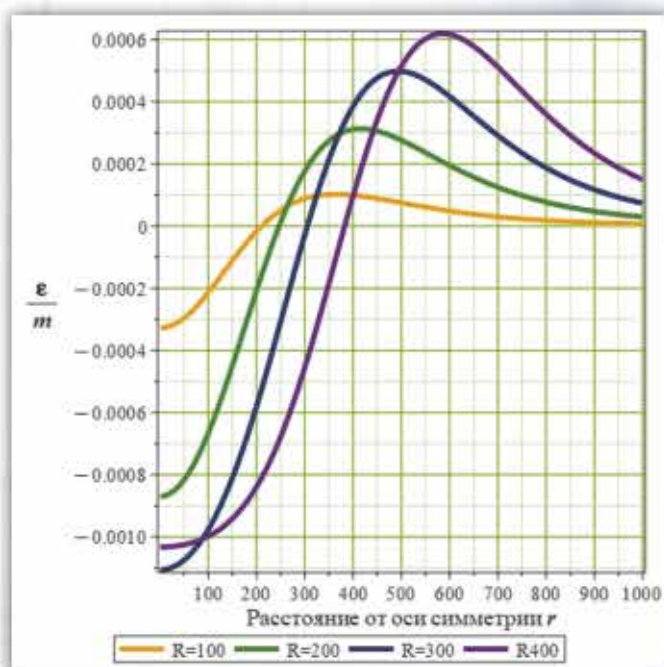


Рис. 6. Развитие радиальных деформаций ϵ земной поверхности (варианты 1 и 2) /
Fig. 6. Development of radial deformations ϵ of the earth's surface (options 1 and 2)

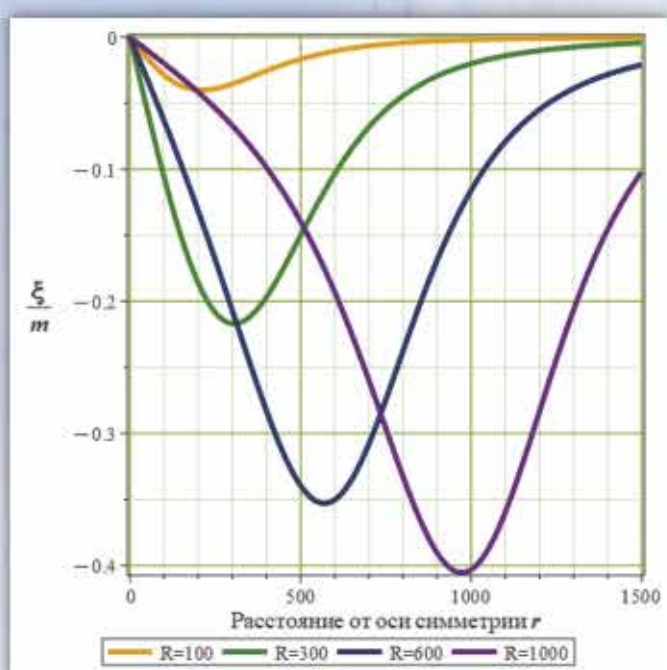
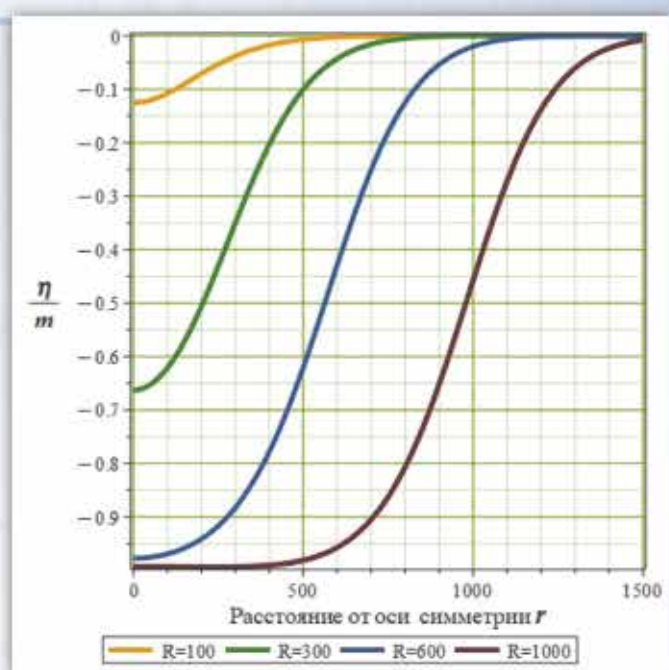


Рис. 7. Развитие оседаний η и радиальных смещений ξ земной поверхности /
Fig. 7. Development of subsidence η and radial displacements ξ of the earth's surface

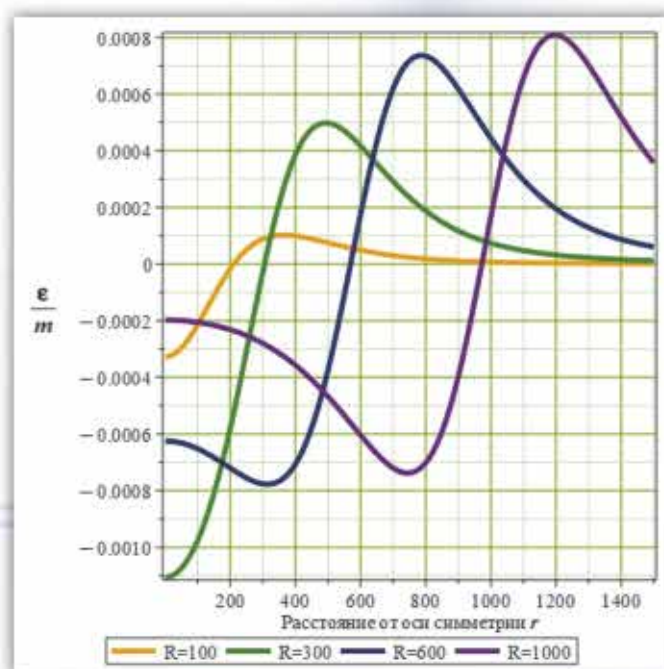


Рис. 8. Развитие радиальных деформаций ϵ земной поверхности /
Fig. 8. Development of radial deformations ϵ of the earth's surface

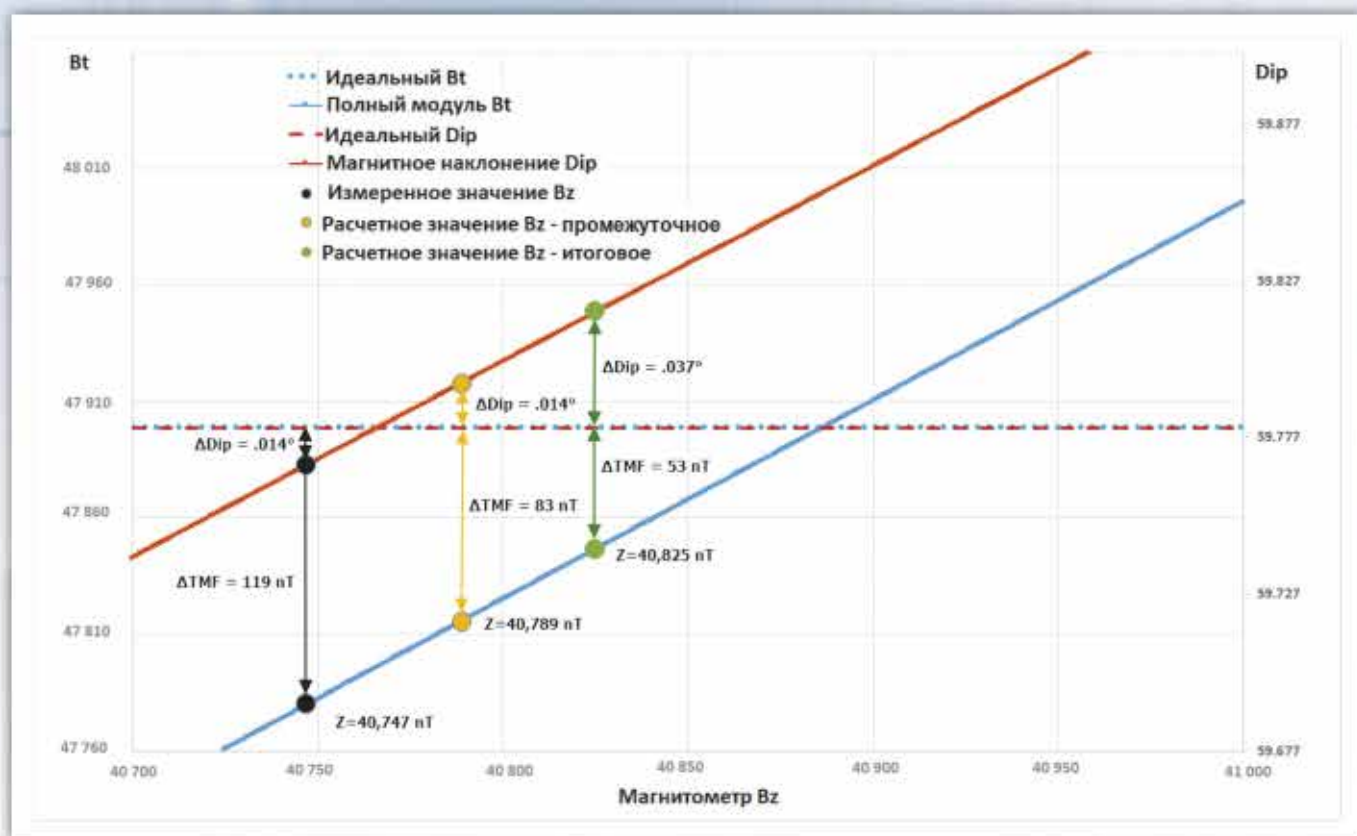


Рис. 4. Пример расчета оптимального значения B_z / Fig. 4. An example of calculating the optimal value of B_z

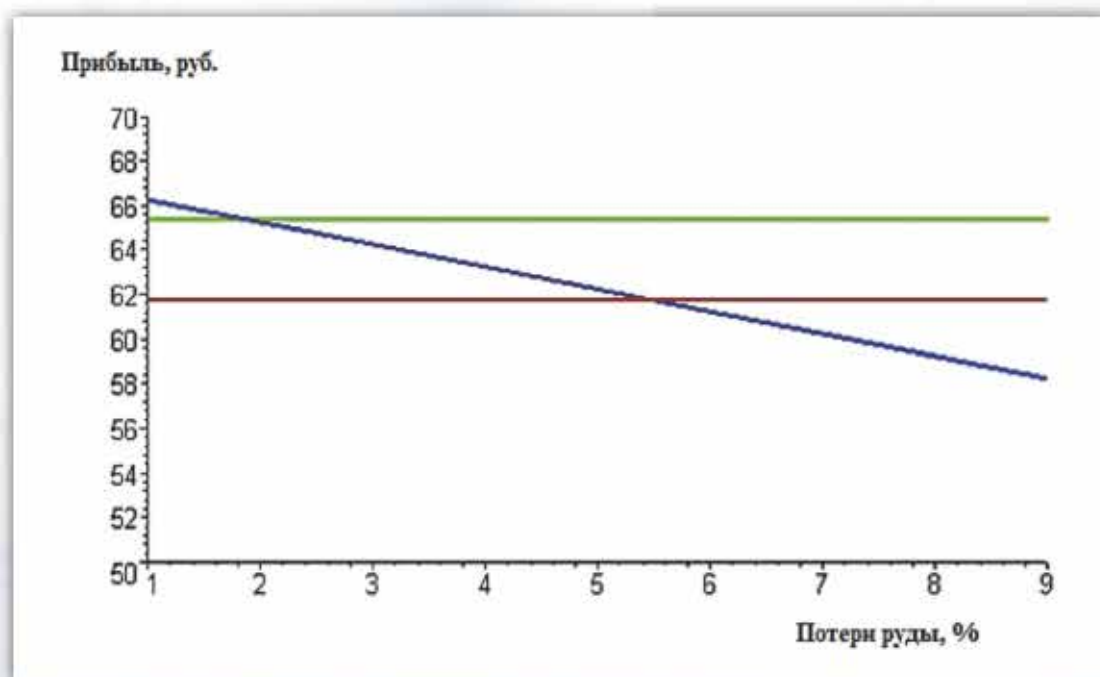


Рис. 4. Зависимость прибыли от потерь руды / Fig. 4. Dependence of profit on ore losses

Применение сайклинг-процесса на газоконденсатных месторождениях Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором

А. Н. Кабиров^{1✉}, А. А. Вольф¹, Д. А. Рожнев²

¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

²ООО «Проектное бюро «Технологии эффективной разработки месторождений»,

г. Тюмень, Российская Федерация

✉ kamalov_tax@bk.ru

Аннотация: Проведено комплексное исследование применения сайклинг-процесса для разработки газоконденсатных месторождений Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором (более 200 г/м³). Рассмотрены физико-химические основы метода, заключающиеся в поддержании пластового давления выше давления начала конденсации для предотвращения ретроградных потерь конденсата в пласте. Представлено математическое описание процесса, включающее расчет коэффициента охвата пласта на основе безразмерного объема закачки и коэффициента вариации проницаемости. Методология включает применение композиционного гидродинамического моделирования с использованием уравнений многокомпонентной двухфазной фильтрации и уравнений состояния. Проведен сравнительный технико-экономический анализ различных сценариев разработки, выявивший повышение коэффициента извлечения конденсата с 45 до 85 %. Установлено критическое влияние геологической неоднородности и налоговых условий на экономическую эффективность проекта. Результаты исследований могут быть полезными при проектировании систем разработки новых газоконденсатных месторождений Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором для максимизации коэффициента извлечения конденсата.

Ключевые слова: Западная Сибирь, газоконденсатные месторождения, сайклинг-процесс, коэффициент извлечения конденсата, поддержание пластового давления

Для цитирования: Кабиров А.Н., Вольф А.А., Рожнев Д.А. Применение сайклинг-процесса на газоконденсатных месторождениях Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):39-43. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-39-43>.

Application of the cycling process at gas condensate fields in Western Siberia with high gas condensate factor

A. N. Kabirov^{1✉}, A. A. Wolf¹, D. A. Rozhnyov²

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen», Tyumen, Russian Federation

²LLC Project Bureau «Technologies for Effective Field Development», Tyumen, Russian Federation

✉ kamalov_tax@bk.ru

Abstract: The article provides a comprehensive study of the application of the recycling process for the development of gas condensate fields in Western Siberia with a high gas condensate factor (more than 200 g/m³). The article discusses the physical and chemical principles of the method, which involves maintaining the reservoir pressure above the condensation pressure to prevent retrograde loss of condensate in the reservoir. The article presents a mathematical description of the process, including the calculation of the reservoir coverage factor based on the dimensionless injection volume and the permeability variation coefficient. The methodology includes the use of compositional hydrodynamic modeling using multi-component two-phase filtration equations and state equations. A comparative technical and economic analysis of various development scenarios was conducted, revealing an increase in the condensate recovery factor from 45% to 85%. The critical impact of geological heterogeneity and tax conditions on the economic efficiency of the project was established. The research findings can be useful in designing development systems for new gas condensate fields in Western Siberia with a high gas condensate factor to maximize the condensate recovery factor.

Keywords: Western Siberia, gas condensate fields, recycling process, condensate recovery factor, reservoir pressure maintenance.

For citation: Kabirov A.N., Wolf A.A., Rozhnyov D.A. Application of the cycling process at gas condensate fields in Western Siberia with high gas condensate factor. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):39–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-39-43>.

Введение

Сайклинг-процесс представляет собой перспективный метод разработки газоконденсатных месторождений, особенно актуальный для залежей Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором (ГКФ), превышающим 200 г/м^3 . Этот метод основан на поддержании пластового давления путем обратной закачки в продуктивный пласт отбензиненного газа после извлечения из него тяжелых углеводородных фракций. Для месторождений Западной Сибири, где конденсат является ценным компонентом, использование сайклинг-процесса позволяет существенно повысить коэффициент извлечения конденсата (до 75–90 % против 40–60 % при традиционной разработке на истощение).

Технология сайклинг-процесса

Физическая сущность сайклинг-процесса заключается в управлении фазовым состоянием пластовой углеводородной системы посредством поддержания пластового давления выше критического уровня, известного как давление начала конденсации. Для газоконденсатной смеси зависимость между давлением, температурой и фазовым состоянием описывается диаграммой фазовых состояний [1]. При разработке на истощение пластовое давление падает и система пересекает линию точек росы, входя в область ретроградной конденсации, где тяжелые углеводороды выпадают в жидкую фазу в пористой среде пласта. Сайклинг-процесс искусственно удерживает давление в пласте выше этого порога, предотвращая необратимые потери ценного конденсата.

Технологическая цепочка представляет собой замкнутый цикл, начинающийся с добычи пластового газа из эксплуатационных скважин. На устье скважины поступает так называемый жирный газ – многокомпонентная смесь, содержащая метан, этан, пропан, бутаны и более тяжелые углеводороды, которые при поверхностных условиях и составляют газовый конденсат. Этот поток, находящийся под высоким давлением, направляется на установку комплексной подготовки газа (УКПГ).

На УКПГ происходит ключевой этап разделения потока. Пластовый газ подвергается низкотемпературной сепарации, где за счет ступенчатого снижения давления и температуры происходит отделение основной массы жидкой фазы – нестабильного газового конденсата. Для интенсификации процесса часто применяются турбодетандеры, обеспечивающие глубокое охлаждение. Последующая очистка газа методами абсорбции или адсорбции, например с использованием гликоля или молекулярных сит, необходима для удаления остаточных паров воды и тяжелых фракций, что предотвращает гидратообразование на дальнейших стадиях. Параллельно полученный нестабильный конденсат стабилизируется на ректификационных колоннах, где из него удаляются легкие углеводороды, чтобы получить товарный продукт, пригодный для транспортировки [2]. В результате установка комплексной подготовки газа выдает два основных продукта: товарный стабильный конденсат, готовый к отправке, и отбензиненный «сухой» газ, основу которого составляет метан.

Далее этот сухой газ направляется на компримирование. Мощные компрессорные станции, оснащенные многоступенчатыми компрессорами, повышают давление газа до уровня, существенно превышающего текущее пластовое давление. Этот этап является одним из наиболее энергоемких во всей технологической цепи. После сжатия и охлаждения газ по системе трубопроводов подается к нагнетательным скважинам, которые расположены в соответствии с выбранной геологической моделью для обеспечения эффективного охвата пласта.

Попадая в пласт, сухой газ выполняет две критически важные функции. Во-первых, он создает дополнительное энергетическое воздействие, компенсируя отбор и поддерживая пластовое давление выше точки начала конденсации [3]. Во-вторых, двигаясь по пласту, он вступает в термодинамическое взаимодействие с оставшимся жирным газом. Происходит процесс вытеснения и массообмена: легкие компоненты закачиваемого газа растворяются в выпавшем конденсате, если он успел образоваться, вызывая его ретроградное испарение и возвращая ценные тяжелые фракции в газовую фазу для последующего извлечения. Таким образом, в установившемся режиме работы система приходит к динамическому балансу, при котором тяжелые фракции систематически извлекаются на поверхности, а легкие компоненты непрерывно циркулируют в замкнутом контуре «пласт – УКПГ – компрессор – пласт», выполняя роль рабочего агента для поддержания пластовой энергии и извлечения целевых продуктов.

Обзор результатов исследований

Исследования А. К. Курбанова и М. Д. Розенберга [4], посвященные фазовым равновесиям в газоконденсатных системах, показали, что для месторождений Западной Сибири с высоким ГКФ ($>200 \text{ г/м}^3$) давление начала конденсации может достигать 28–32 МПа, что существенно сужает «окно» для безаварийной разработки на истощение. Авторами была экспериментально подтверждена ключевая роль ретроградного испарения при закачке сухого газа, которое является обратным процессом ретроградной конденсации и приводит к переходу жидкой фазы обратно в газовую.

Работы В. И. Воропай [5] позволили количественно описать механизм вытеснения жирного газа сухим в пористой среде. Было установлено, что наиболее вероятным механизмом извлечения конденсата при сайклинг-процессе является не простое «выталкивание», а сложный процесс многофазного многокомпонентного вытеснения, сопровождающийся массообменом между фазами. Формирование и перемещение фронта вытеснения происходит за счет перераспределения компонентов между жирным газом, выпавшим конденсатом и закачиваемым сухим газом. В процессах массообмена участвуют конвективный и диффузионный переносы углеводородных компонентов, причем эффективность извлечения тяжелых фракций (C_3+) напрямую зависит от степени контакта фаз и скорости закачки.

Исследования, проведенные под руководством

В. А. Шпиляман [6], были сфокусированы на практической реализации сайклинг-процесса в неоднородных пластах Западной Сибири. Моделирование показало, что коэффициент вариации проницаемости является критическим параметром, определяющим коэффициент охвата пласта. Было выявлено, что при высокой неоднородности ($V > 0,7$) происходит преждевременный прорыв закачиваемого газа по высокопроницаемым пропласткам, что резко снижает эффективность процесса. Для борьбы с этим явлением был предложен метод селективного воздействия на пласт, включающий применение гелевых систем для изоляции наиболее проницаемых зон.

Монография Г. Р. Гуцериева и Ю. П. Жагрина [7] детально описывает термодинамические основы сайклинг-процесса. Авторами подчеркивается, что закачка сухого газа не только поддерживает давление, но и вызывает изотермическое перераспределение компонентов в пластовой системе. Ключевым является явление смещения давления начала конденсации в сторону более низких значений при разбавлении пластового газа сухим, что расширяет безопасный диапазон давлений для разработки. Физико-химическая сущность процесса заключается в нарушении фазового равновесия и сдвиге точки росы за счет изменения состава системы [8].

Цель исследований: разработка научно-методического подхода для оценки эффективности применения сайклинг-процесса для газоконденсатных месторождений Западной Сибири с высоким газоконденсатным фактором (ГКФ).

Методика исследований

Включает в себя математическое моделирование процесса, анализ влияния геологической неоднородности и экономическое обоснование с учетом действующих налоговых условий.

Методика расчета и математическое моделирование

Математическое описание сайклинг-процесса основывается на комплексном решении системы уравнений, включающей законы сохранения массы, фазовые равновесия и фильтрационные зависимости [9]. Ключевым параметром является коэффициент охвата пласта вытеснением $f_{\text{ошв}}$, который количественно определяет долю газонасыщенного объема пласта, вовлеченную в процесс вытеснения жирного газа сухим.

Для его расчета используется безразмерный объем закачки Q , определяемый как отношение объема газа, закачанного в пласт к начальным запасам газа.

$$Q = \frac{Q_{\text{пл.зак.}}}{Q_{\text{зип}}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{пл.зак.}}$ – объем газа, закачанный в пласт;

$Q_{\text{зип}}$ – начальные извлекаемые запасы газа [1].

Прорывное значение коэффициента охвата, соответствующее моменту первого появления закачиваемого газа в добывающих скважинах, рассчитывается по эмпирической зависимости от коэффициента вариации проницаемости V [10], который характеризует геологическую неоднородность пласта.

$$f = 0,636 + 0,552V - 0,804V^2. \quad (2)$$

Сам коэффициент вариации является статистической мерой и вычисляется как отношение стандартного отклонения проницаемости σ к ее среднему значению:

$$V = \frac{\sigma}{k_{\text{ср}}} \quad (3)$$

где стандартное отклонение рассчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sum k_i) - k_{\text{ср}}^2}{n-1}} \quad (4)$$

Средняя проницаемость определяется как среднеарифметическая взвешенная по мощности пластов.

Для значений безразмерной закачки, не превышающих прорывное, принимается условие, что коэффициент охвата равен объему закачки, то есть $f = Q$ [11].

После прорыва закачиваемого газа зависимостью становится нелинейной и описывается экспоненциальной функцией

$$f = 0,98239 - 0,97303e^{-1,33449Q}. \quad (5)$$

Более фундаментальное моделирование требует применения композиционной гидродинамической модели, которая решает систему уравнений многокомпонентной двухфазной фильтрации [12].

Основу составляет уравнение неразрывности для каждого компонента в газовой и жидкой фазах

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \theta \cdot \Delta t \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = -\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t \cdot \text{grad}(\rho \cdot v). \quad (6)$$

Фазовые проницаемости являются функциями насыщенности, описываемыми моделями Кори – Брода [13]. Система уравнений замыкается условиями фазового равновесия, описываемыми равенством фугитивностей каждого компонента в газовой и жидкой фазах, с использованием уравнения состояния Пенга – Робинсона.

Результаты исследований

Практические аспекты применения сайклинг-процесса в Западной Сибири

Технологические и экономические вызовы внедрения сайклинг-процесса на месторождениях Западной Сибири требуют детального рассмотрения. Высокие капитальные затраты обусловлены необходимостью строительства мощных компрессорных станций, способных обеспечить давление закачки, на 15–20 % превышающее пластовое давление [14].

Для месторождения с запасами 500 млрд м³ газа стоимость компрессорного оборудования может достигать 80–100 млрд рублей, что подтверждается данными таблицы 1.

Из таблицы 1 видно, что CAPEX для сценария с сайклинг-процессом в 2,5 раза превышает аналогичный показатель для традиционной разработки. Эксплуатационные расходы складываются из энергозатрат на компримирование газа (50–60 % OPEX), затрат на химические реагенты (15–20 %) и технического обслуживания (25–30 %).

Снижение энергоемкости процесса достигается за счет применения турбодетандерных установок и оптимизации работы компрессорного парка, что позволяет уменьшить удельные операционные затраты с 2200 до 2000 рублей на тыс. м³.

Таблица 1 / Table 1
Экономическое сравнение процессов разработки /
Economic comparison of development processes

Показатель	Разработка на истощение	Сайклинг-процесс (базовый)	Сайклинг-процесс (оптимизированный)
КИК, %	45	70	85
CAPEX, млрд руб.	50	120	140
OPEX, руб./тыс. м ³	800	2 200	2 000
NPV, млрд руб.	80	150	220
Срок окупаемости, лет	4	8	7

Геологическая неоднородность продуктивных пластов, характерная для залежей Западной Сибири, проявляется в коэффициенте вариации проницаемости V , значения которого варьируются от 0,3 до 0,9 [15].

Из таблицы 2 видно, что при увеличении V с 0,3 до 0,9 прогнозируемый коэффициент извлечения конденсата снижается с 78 до 55 %, что обусловлено ухудшением охвата пласта вытеснением.

Таблица 2 / Table 2
Зависимость КИК от анизотропии /
Dependence of the condensate extraction coefficient on anisotropy

Коэффициент вариации, V	Коэффициент охвата пласта, $f_{\text{опр}}$	КИК, %
0,3	0,48	78
0,6	0,41	65
0,9	0,35	55

Для компенсации этого эффекта применяются технологии селективного воздействия, включая использование гелевых систем и механизмов управления направленностью закачки.

Критическим фактором эффективности является временной аспект реализации проекта. Запуск сайклинг-процесса на стадии, когда пластовое давление уже снизилось на 25–30 % от начального, приводит к безвозвратной потере до 40 % конденсата из-за ретроградных явлений. Оптимальным считается начало закачки при достижении депрессии не более 10–15 % от первоначального давления.

Налоговые условия оказывают решающее влияние на экономику проектов. Действующая система налогообложения, при которой НДС взимается с полного объема добытого газа, включая закачиваемую часть, создает дополнительную фискальную нагрузку в размере 15–20 % от операционных затрат.

Сравнительный анализ, приведенный в таблице 3, наглядно показывает, что даже частичное освобождение от НДС закачиваемого газа повышает NPV проекта на 25–30 %, а полная отмена данного налога увеличивает внутреннюю норму доходности с 12 до 22 %.

Таблица 3 / Table 3
Экономическая чувствительность к налоговым условиям /
Economic sensitivity to tax conditions

Налоговый режим	NPV, млрд руб.	IRR, %
Действующий	150	12
Частичное освобождение	190	16
Полное освобождение	250	22

Заключение

1. Сайклинг-процесс представляет собой эффективную технологию для разработки газоконденсатных месторождений Западной Сибири с высоким ГКФ. При правильном проектировании и реализации сайклинг-процесс позволяет значительно увеличить коэффициент извлечения конденсата и реализовать принципы рационального природопользования.

2. Перспективы развития технологии в регионе связаны с такими мероприятиями, как:

- разработка усовершенствованных методик расчета с учетом специфики месторождений;
- создание благоприятной налоговой среды для стимулирования инвестиций в сайклинг-процесс;
- развитие отечественного оборудования для компримирования и закачки газа.

3. С учетом истощения традиционных месторождений и растущей потребности в углеводородном сырье доказано, что внедрение сайклинг-процесса на месторождениях Западной Сибири является не только экономически целесообразным, но и стратегически важным для устойчивого развития газовой отрасли России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Румма В.В., Синцов И.А. Преимущества и недостатки технологии сайклинг-процесса. Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых, Нижневартовск, 20 апреля 2017 года. Нижневартовск, 2017; 1: 103–105.
Rumma V.V., Sintsov I.A. Advantages and disadvantages of the cycling process technology. Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex: Proceedings of the International scientific and practical conference of students, graduate students and scientists, Nizhnevartovsk, April 20, 2017. Nizhnevartovsk, 2017; 1: 103–105. (In Russ.).
2. Чебан С.Е., Мулявин С.В. Увеличение коэффициента извлечения конденсата с помощью сайклинг-процесса. Академический журнал Западной Сибири. 2015; 11 (4(59)): 35–37.
Cheban S.E., Mulyavin S.F. Increasing the condensate recovery factor using the cycling process. Academic Journal of Western Siberia. 2015; 11 (4 (59)): 35–37. (In Russ.).
3. Урванцев Р.В., Чебан С.Е. Анализ и перспективы использования сайклинг-процесса на объекте Ос Верхнеконского месторождения. Научный форум. Сибирь. 2015; 1: 75–76.
Urvantsev R.V., Cheban S.E. Analysis and Prospects of Using the Cycling Process at the Os Facility of the Verkhnechonskoye Field. Scientific Forum. Siberia. 2015; 1: 75–76. (In Russ.).
4. Розенберг М.Д., Кундин С.А., Курбанов А.К. Фильтрация газированной жидкости и других многокомпонентных смесей в нефтяных пластах. М.: Недра, 1969.
Rosenberg M.D., Kundin S.A., Kurbanov A.K. Filtration of Gas-Saturated Liquid and Other Multicomponent Mixtures in Oil Reservoirs. Moscow: Nedra, 1969. (In Russ.).

5. Воропай Н.И., Руденко Ю.Н., Розанов М.Н. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочник. В 4 т. М.: Недра, 2000. Voropay N.I., Rudenko Yu.N., Rozanov M.N. Reliability of Power Systems and Their Equipment: Handbook: In 4 volumes. Moscow: Nedra, 2000. (In Russ.).
6. Шпильман В.А. Сайклинг-процесс при разработке газоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1990. - 215 с. ISBN 5-247-01304-9. Shpilman V.A. Cycling Process in Gas Condensate Field Development. Moscow: Nedra, 1990. - 215 p. ISBN 5-247-01304-9. (In Russ.).
7. Гуревич Г.Р., Тышляр И.С., Гаспарян В.Р., Зверикова Г.Я. Сайклинг-процесс и промысловая обработка газа на конденсатонефтяных месторождениях. М.: Недра, 1990. Gurevich G.R., Tyshlyar I.S., Gasparyan V.R., Zverikova G.Ya. Cycling Process and Field Processing of Gas at Condensate-Oil Fields. Moscow: Nedra, 1990. (In Russ.).
8. Закиров С.Н., Индрупский И.М., Рошина И.В. и др. Новая технология вертикально-латерального сайклинг-процесса с использованием горизонтальных скважин. *Георесурсы, геознергетика, геополитика*. 2010; 1 (1): 12. Zakirov S.N., Indrupskiy I.M., Roshchina I.V., et al. New technology of vertical-lateral cycling process using horizontal wells. *Georesources, geoenergetics, geopolitics*. 2010; 1 (1): 12. (In Russ.).
9. Краснова Е.И., Самуйлова Л.В., Краснов И.И. и др. Оценка причин, осложняющих разработку Комсомольского газоконденсатного месторождения. *Академический журнал Западной Сибири*. 2013; 9 (3 (46)): 110-111. Krasnova E.I., Samoylova L.V., Krasnov I.I., et al. Assessment of factors complicating the development of the Komsomolskoye gas condensate field. *Academic Journal of Western Siberia*. 2013; 9 (3 (46)): 110-111. (In Russ.).
10. Ваганов Е.В., Краснова Е.И., Краснов И.И. и др. Изучение зависимости конденсатоотдачи от содержания конденсата в пластовом газе. *Академический журнал Западной Сибири*. 2014; 10 (1 (50)): 118. Vaganov E.V., Krasnova E.I., Krasnov I.I., et al. Study of the dependence of condensate recovery on the condensate content in formation gas. *Academic Journal of Western Siberia*. 2014; 10 (1 (50)): 118. (In Russ.).
11. Хлус А.А., Краснов И.И., Зотова О.П. и др. Прогноз фазовых процессов углеводородных систем при разработке нефтегазоконденсатных месторождений. *Академический журнал Западной Сибири*. 2014; 10 (6 (55)): 1-22. Khlus A.A., Krasnov I.I., Zotova O.P., et al. Forecasting phase processes of hydrocarbon systems during the development of oil and gas condensate fields. *Academic Journal of Western Siberia*. 2014; 10 (6 (55)): 21-22. (In Russ.).
12. Грачев С.И., Краснова Е.И., Ваганов Е.В., и др. Интенсификация и регулирование процесса разработки горизонта БС10-2. *Академический журнал Западной Сибири*. 2015; 11 (3 (58)): 95-97. Grachev S.I., Krasnova E.I., Vaganov E.V., et al. Intensification and regulation of the development process of the BS10-2 horizon. *Academic Journal of Western Siberia*. 2015; 11 (3 (58)): 95-97. (In Russ.).
13. Fevang Ø., Whitson C.H. Modeling Gas-Condensate Well Deliverability. *SPE Reservoir Engineering*. 1996; 11 (04): 221-230.
14. Парфенова Н.М. и др. Характеристика и направления рационального использования газоконденсатов Ачимовских отложений Уренгойского НГКМ. *Территория Нефтегаз*. 2014; 6: 70-76. Parfenova N.M. et al. Characteristics and directions of rational use of gas condensates of the Achimov deposits of the Urengoy oil and gas condensate field. *Territory of Oil and Gas*. 2014; 6: 70-76. (In Russ.).
15. Шарипов А.Ю., Ильин А.С. Технология повышения газоотдачи пласта. *Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума*. Томск, 2015; 2: 140-141. Sharipov A.Yu., Ilyin A.S. Technology of enhanced gas recovery. *Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XIX International Symposium*. Tomsk, 2015; 2: 140-141. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Наильевич Кабиров – аспирант Тюменского индустриального университета, 625000, г. Тюмень, Российская Федерация; e-mail: aleksey.cabirov@yandex.ru

Альберт Альбертович Вольф – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета, 625000, г. Тюмень, Российская Федерация; e-mail: albert_volf@mail.ru

Дмитрий Андреевич Рожнев – заведующий отделом нефтепромысловой геологии и разработки ООО «ПБ «ТЭРМ», 625000, г. Тюмень, Российская Федерация; e-mail: rojnev.dima2013@yandex.ru

Критерии авторства:

авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Поступила после рецензирования: 24.10.2025

Принята к публикации: 31.10.2025

ABOUT THE AUTHORS

Alexey N. Kabirov – postgraduate student of Tyumen Industrial University, 625000, Tyumen, Russian Federation; e-mail: aleksey.cabirov@yandex.ru

Albert A. Wolf – Cand. Sci. (Phys. & Math.), associate Professor, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Tyumen Industrial University, 625000, Tyumen, Russian Federation; e-mail: albert_volf@mail.ru

Dmitry A. Rozhnyov – head of the Department of Oilfield Geology and Development LLC «PB «TERM», 625000, Tyumen, Russian Federation; e-mail: rojnev.dima2013@yandex.ru

Contribution:

The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 01.10.2025

Revised: 24.10.2025

Accepted: 31.10.2025

Использование природных ресурсов юга России

В. И. Голык[✉]

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ,

Российская Федерация

✉ v.i.golik@vail.ru

Аннотация: Состояние природных ресурсов и тенденции их использования становятся актуальнее с увеличением потребности отраслей промышленности в металле. Предложено в качестве гаранта разделения зон производства и рекреации принять условие сохранности земной поверхности. Сформирована модель для определения эколого-экономической эффективности природосбережения. Предложен показатель производственно-экологического совершенства предприятия. Разработан алгоритм управления потенциалом горного предприятия. Определены объекты модернизации промышленности РСО-Алания. Реализация методики исследований позволяет оптимизировать параметры выщелачивания металлов, снизить затраты на их добычу, увеличить диапазон применения ресурсо- и природосберегающей технологии, оптимизировать производство на действующих предприятиях и повысить качество проектов освоения новых месторождений.

Ключевые слова: природосбережение, ресурсы, РСО-Алания, металлы, модель, алгоритм управления, выщелачивание, технология

Для цитирования: Голык В.И. Использование природных ресурсов юга России. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):44-48. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-44-48>.

Use of natural resources in the south of Russia

V. I. Golik[✉]

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz,

Russian Federation

✉ v.i.golik@vail.ru

Abstract: The state of natural resources and trends in their use are becoming more relevant with the increasing demand of industries for metal. It is proposed to accept the condition of preservation of the earth's surface as a guarantor of the separation of production and recreation zones. A model has been formed to determine the ecological and economic efficiency of environmental conservation. The indicator of industrial and ecological perfection of the enterprise is proposed. An algorithm for managing the potential of a mining enterprise has been developed. The objects of modernization of the RSO-Alania industry have been identified. The implementation of the research methodology makes it possible to optimize the parameters of metal leaching, reduce the cost of their extraction, increase the range of applications of resource- and nature-saving technologies, optimize production at existing enterprises and improve the quality of projects for the development of new deposits.

Keywords: environmental conservation, resources, RSO-Alania, metal, model, management algorithm, leaching, technology

For citation: Golik V.I. Use of natural resources in the south of Russia. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):44-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-44-48>.

Введение

История человечества представляет собой смену источников энергии, в основе которой лежат экономические критерии. Колоссальное увеличение потребления природных ресурсов является следствием демографического взрыва и научно-технической революции. Отходы производства загрязняют окружающую природную среду, провоцируя онкологические, легочные и сердечно-сосудистые заболевания [1–4].

Природа является объектом рационального природопользования, а отрасль, хозяйство, предприятие и тому подобное – субъектами рационального природопользования [5–7]. Оценка потенциальной экологической опасности использования природно-техногенных комплексов, в том числе некондиционного сырья и отходов обогащения руд производится с учетом мер обеспечения экологической и ресурсной безопасности [8–10].

Сформирована концепция устойчивого социально-э-

кономического развития горнодобывающих предприятий с комплексной оценкой геоэкологических рисков для горных работ [11–14]. Концепция включает в себя направление извлечения металлов из хвостов обогащения руд и некондиционного минерального сырья инновационными методами, в том числе корректировки свойств в активаторах [15–17].

Специалистами затронутого направления разработаны научные основы природоохранных и ресурсосберегающих технологий добычи и переработки металлосодержащих ресурсов с приоритетным критерием эффективности в виде минимизации ущерба природным ресурсам [18–21].

Цель работы: детализация представлений о состоянии природных ресурсов Юга России и их использовании с увеличением потребности отраслей промышленности в металле.

Методы исследования

При организации исследований использованы общепринятые методы: обобщение и анализ результатов натурных и лабораторных исследований, а также сведения из публикаций автора и специалистов этого направления горного дела.

Результаты

Человек воздействует на природу по схеме (рис. 1).

Гарантом разделения зон производства и рекреации является сохранность земной поверхности (рис. 2).

При утилизации потерянного сырья стоимость полезных компонентов на завершающем этапе увеличивается с C до C_n

$$C_n = (1 + K_n)C, \quad (1)$$

где K_n – поправочный коэффициент.

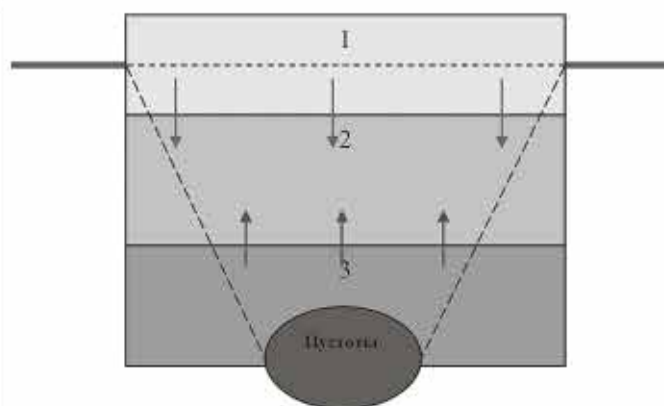


Рис. 2. Влияние горных работ на зоны: 1 – жизнедеятельности; 2 – разделительная; 3 – техногенного разрушения / Fig. 2. The impact of mining operations on the zones: 1 – vital activity; 2 – separation; 3 – man-made destruction

Модель эколого-экономической эффективности природосбережения

$$\mathcal{E}_n = \sum_i Q_i C_i - Q_i C_i - Q_i C_i - Q_i C_i, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_n$ – эколого-экономический эффект;
 Q_i – количество i -го ресурса;
 n – количество видов ресурсов;
 C_i – ценность единицы i -го ресурса;
 Q_a – ресурсы нарушенной атмосферы;
 Q_z – ресурсы нарушенной гидросферы;
 Q_{λ} – ресурсы нарушенной литосферы;
 C_a – ценность ресурсов атмосферы;
 C_z – ценность ресурсов гидросферы;
 C_{λ} – ценность ресурсов литосферы.



Рис. 1. Алгоритм принятия управленческих решений / Fig. 1. The algorithm of managerial decision-making



Рис. 3. Алгоритм управления потенциалом горного предприятия / Fig. 3. Algorithm of mining enterprise potential management

Стоимость необходимого для реабилитации окружающей среды решения

$$C_m = Z_n + Z_{oc}, \quad (3)$$

где C_m – цена производимой продукции;
 Z_n – затраты на производство;
 Z_{oc} – затраты на охрану окружающей среды.

Показатель совершенства предприятия K_s

$$K_s = \frac{(P_n - Y_e)}{P_n} \quad (4)$$

где P_n – приносимая польза, руб.;
 Y_e – ущерб окружающей среде, руб.

Роль управленческих факторов поясняется на рисунке 3.

Фактором, участвующим в повышении эффективности производства, является плата за природные ресурсы (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 38).

Эффект использования природных ресурсов C определяется величиной предотвращенного ущерба Y и прироста доходов в результате улучшения производственных результатов предприятий ΔP :

$$C = Y + \Delta P. \quad (5)$$

Одним из результатов совершенствования управления ресурсами является создание новых рабочих мест (таблица).

Таблица / Table

Объекты модернизации промышленности РСО-Алания /
Industrial modernization facilities of the Republic of North Ossetia-Alania

Промышленный комплекс	Технология	Сырьевая база, г	Рабочие места
Садонский СЦК	Подземное выщелачивание некондиционных по содержанию металлов запасов	60	300
		40	300
		100	400
Электроцинк	Выщелачивание хвостов металлургии	26	200
Садонский СЦК	Выщелачивание хвостов обогащения с механохимической активацией	24	150
		26	150

Выводы

1. Детализация представлений об использовании основных природных ресурсов позволяет уточнить роль и значимость процессов взаимодействия с природой.
2. Ключевые направления развития горного производства включают в себя повышение полноты и комплексности пользования природными ресурсами и совершенствования методов защиты людей, фауны и флоры.
3. Результаты исследования рекомендуются для оптимизации производства на действующих предприятиях и повышения качества проектов освоения новых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы. *Записки Горного института*. 2022; 256: 503-504.
Alexandrova T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin: state and prospects. *Notes of the Mining Institute*. 2022; 256: 503-504. (In Russ.).
2. Каунг П.А., Исаков А.Е., Панфилов И.А. и др. Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024; 7–1: 159-175.
Kaung P.A., Isakov A.E., Panfilov I.A., et al. Principles of formation of environmentally safe and economically effective sustainable development of georesources. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2024; 7–1: 159-175. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.
3. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020; 5 (2): 104-118.
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental protection and resource-saving technologies of underground ore mining in energy-damaged massifs. *Mining sciences and Technologies*. 2020; 5(2): 104-118. (In Russ.).
4. Kamariah N., Kalebic D., Xanthopoulos P., et al. Conventional versus microwave-assisted roasting of sulfidic tailings: mineralogical transformation and metal leaching behavior. *Minerals Engineering*. 2022; 183: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107587>.
5. Соколов А.А., Мирошников А.С., Соколова Е.А. Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса – внешняя среда». *Горный журнал*. 2016; 12: 83-86.
Sokolov A.A., Miroshnikov A.S., Sokolova E.A. Algorithms for managing the stability of the system "enterprise of the mining and metallurgical complex – the external environment". *Mining Journal*. 2016; 12: 83-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.17>.
6. Nayak A., Ashrit S., Jena M. S., et al. Mineralogical characterization for selection of possible beneficiation route for low-grade lead-zinc ore of Rampura Agucha, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020; 73 (3): 775-784. <https://doi.org/10.1007/S12666-020-01887-Y>.
7. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020; 37 (5): 1385-1399.
Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А. и др. Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья. *Геосферные исследования*. 2020; 2: 64-67.
8. Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., et al. Assessment of the potential ecological danger of natural and man-made complexes of ore deposits in Eastern Transbaikalia. *Geospheric research*. 2020; 2: 64-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/15/5>.
9. Валнев Н.Г., Пропп В.Д., Абрамкин Н.И. и др. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 12-1: 17-30.
Valiev N.G., Propp V.D., Abramkin N.I., et al. The practice of using alkali metals from substandard raw materials and ore dressing waste. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2023; 12-1: 17-30 (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
10. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В. и др. Повышение безопасности подземной добычи руд учетом геодинамики массива. *Безопасность труда в промышленности*. 2019; 8: 36-42.
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., et al. Improving the safety of underground ore mining taking into account the geodynamics of the massif. *Occupational safety in industry*. 2019; 8: 36-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-8-36-42>.
11. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б. и др. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3(49)): 405-415.
Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., et al. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable development of mountainous territories*. 2021; 13 (3(49)): 405-415. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>.
12. Каплан А.В., Баев И.А., Терешина М.А. Концепция устойчивого социально-экономического развития горнодобывающего предприятия. *Вестник ЮУрГУ*. 2018; 3: 76-79.
Kaplan A.V., Baev I.A., Tereshina M.A. The concept of sustainable socio-economic development of a mining enterprise. *Bulletin of SUSU*. 2018; 3: 76-79. (In Russ.).
13. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024; 16 (1): 205-216.
Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Comprehensive assessment of geoecological risks in open-pit and underground mining operations. *Sustainable development of mountainous territories*. 2024; 16 (1): 205-216. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216>.
14. Xie H., Zhao J.W., Zhou H.W., et al. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 96: 103129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103129>.
15. Khayrutdinov A., Kongar-Syuryun Ch., Kowalik T., et al. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite enrichment waste for non-waste geotechnology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867(1): 012-018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012018>.
16. Yang Y., Qiu W., Liu Z., et al. Quantifying the impact of mineralogical heterogeneity on reactive transport modeling of CO₂ + O₂ in-situ leaching of uranium. *Acta Geochimica*. 2022; 41: 50-63. <https://doi.org/10.1007/S11631-021-00502-1>.
17. Голик В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации. *Обогащение руд*. 2010; 5: 38-40.
Golik V.I. Extraction of metals from tailings of enrichment by combined activation methods. *Ore enrichment*. 2010; 5: 38-40. (In Russ.).
18. Игнатьева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В. и др. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021; 6 (2): 73-89.
Ignatieva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., et al. Technogenic mineral formations: problems of transition to a circular economy. *Mining Sciences and technologies*. 2021; 6 (2): 73-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>.
19. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее. *Горный журнал*. 2020; 9: 13-18.
Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Digital transformation of the mining industry: past, present, future. *Mining Journal*. 2020; 9: 13-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/GZH.2020.09.01>.

20. Фоменко В.А., Соколов А.А., Лолаев А.Б., и др. Некоторые результаты работ по оценке эманаций радона Унальского хвостохранилища. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022; 14 (4): 576-585.
Fomenko V.A., Sokolov A.A., Lolaev A.B., et al. Some results of work on the assessment of radon emanations of the Unalsky tailings reservoir. *Sustainable development of mountainous territories*. 2022; 14 (4): 576-585. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585>.
21. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Бурдонов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (1): 130-141.
Rasskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of persistent primary ores of the Malmyzhskoye deposit. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023; (1): 130-141. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_130.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Иванович Галик –
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник.
Геофизический институт Владикавказского научного
центра, 363110, г. Владикавказ, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.08.2025
Поступила после рецензирования: 20.09.2025
Принята к публикации: 26.09.2025

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir I. Golik –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center, 363110, Vladikavkaz,
Russian Federation

Article info

Received: 08.08.2025
Revised: 20.09.2025
Accepted: 26.09.2025

Геолого-структурный анализ месторождения арылах (Магаданская область) и адаптация технологий добычи на современном этапе

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифуллина¹,
Н. Е. Ломакина¹, Е. С. Семькин¹

¹ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт)», г. Магадан,
Российская Федерация

²Высшая школа государственного аудита МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация
✉ vvnika@mail.ru

Аннотация: Проведен геолого-структурный анализ месторождения Арылах, расположенного в Среднеканском районе Магаданской области, одного из ключевых объектов золото-серебряного оруденения региона. Особое внимание уделено влиянию геологических и метаморфических характеристик на выбор и адаптацию методов добычи в современных условиях. Детально рассмотрены литологические особенности, структуры разломов, горно-геологические условия сложного многолетнемерзлого массива, а также применимые и рекомендованные технологии разработки. На основе анализа современных горнотехнических решений обоснована оптимизация системы разработки с внедрением камерно-столбовой системы и цифровых технологий, направленных на повышение эффективности и безопасности производства.

Ключевые слова: месторождение Арылах, геолого-структурный анализ, золото-серебряное оруденение, способы отработки, многолетняя мерзлота, камерно-столбовая система, цифровые технологии, геомеханическое моделирование, экологическая безопасность

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы выражают благодарность коллегам и сотрудникам ОАО «Полиметалл» за предоставленные материалы и консультации. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифуллина И.Ю., Ломакина Н.Е., Семькин Е.С. Геолого-структурный анализ месторождения Арылах (Магаданская область) и адаптация технологий добычи на современном этапе. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):49-54. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-49-54>.

Geological and structural analysis of the arylyakh deposit (Magadan region) and adaptation of mining technologies at the current stage

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Y. Garifulina¹,
N. E. Lomakina¹, E. S. Semykin¹

¹North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

²Higher School of Economics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
✉ vvnika@mail.ru

Abstract: The article provides a geological and structural analysis of the Arylyakh deposit, located in the Srednekansky District of the Magadan Region, one of the key gold-silver ore deposits in the region. Special attention is given to the influence of geological and metamorphic characteristics on the selection and adaptation of mining methods in modern conditions. The article provides a detailed examination of the lithological features, fault structures, and mining and geological conditions of the complex permafrost massif, as well as the applicable and recommended mining technologies. Based on the analysis of modern mining solutions, the optimization of the mining system has been substantiated by introducing a chamber-pillar system and digital technologies aimed at improving the efficiency and safety of production.

© Арно В. В., Колесниченко Е. П., Гарифуллина И. Ю., Ломакина Н. Е., Семькин Е. С., 2025

Keywords: Arylyakh deposit, geological and structural analysis, gold-silver mineralization, mining methods, permafrost, chamber-pillar system, digital technologies, geomechanical modeling, and environmental safety

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors express their gratitude to colleagues and employees of Polymetal JSC for the provided materials and consultations. The research was funded by the authors' own resources.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulin I.Y., Lomakina N.E., Semykin E.S. Geological and structural analysis of the Arylyakh deposit (Magadan region) and adaptation of mining technologies at the current stage. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):49-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-49-54>.

Введение

Месторождение Арылах, расположенное в Среднеканском районе Магаданской области, – одно из ключевых месторождений золота и серебра в Магаданской области, обладающее сложной геолого-структурной характеристикой. Сложность строения и условия залегания руды обуславливают необходимость адаптивного выбора методов добычи с целью максимизации извлечения полезного компонента и минимизации потерь.

С 2019 года применяется подэтажная выемка с закладкой. Однако в связи с новыми технологическими возможностями и изменениями горно-геологических условий проведение обновленного анализа и рекомендации оптимального метода разработки на 2025 год являются актуальными задачами.

Цель исследований: обоснование оптимального выбора и адаптации современных способов разработки и горнотехнических решений для месторождения Арылах с учетом его геолого-структурных, литологических и метаморфических особенностей, а также влияния многолетней мерзлоты на устойчивость массива.

Исследование направлено на повышение эффективности, безопасности и экологической устойчивости добычи путем внедрения камерно-столбовой системы и цифровых технологий, адаптированных к сложным горно-геологическим условиям региона.

Материал и методы исследований

Геологический анализ основан на материалах бурения, геофизических исследованиях и документации ОАО «Полиметалл».

Методы исследования включают структурный анализ разломных систем, изучение морфологии жил, анализ минерального состава и типологических характеристик горных пород. Оценка горно-геологических условий включает изучение устойчивости пород и анализа температурного режима, влияющего на мерзлотные процессы. Анализ систем разработки основан на данных эксплуатации, а также моделировании и оптимизации горнотехнических процессов.

Результаты исследований

Месторождение располагается в Балыгычано-Сугойской зоне и включает рудные тела сульфидно-кварцевого состава, приуроченные к сбросовым нарушениям с простираемостью около 30°. Ключевыми являются рудные зоны VII (48,7 % руды, 50 % серебра) с углом падения 70–90° и апофизы зон VIII и IX с высоким содержанием серебра. Вмещающие породы представлены терригенными и вулканогенными образованиями: риолитами, андезитами, туфами и алевритами. Породы характеризуются высокой трещиноватостью и изменчивой устойчивостью.

Основные геолого-структурные, литологические и ме-

таморфические особенности месторождения, влияющие на методы разработки и горнотехнические решения, приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Геологическое и метаморфическое строение месторождения Арылах / Geological and metamorphic structure of the Arylyakh deposit

Параметр / Parameter	Значение / Characteristic
Расположение	Балыгычано-Сугойская структурно-металлогеническая зона
Тип рудных тел	Сульфидно-кварцевые жилы приурочены к сбросовым нарушениям
Основные рудные зоны	Зона VII (48,7 % руды, 50 % серебра), простираемость – 30°, падение – 70–90°, апофизы зон VIII и IX с высоким содержанием серебра
Вмещающие породы	Риолиты, андезиты, туфы, алевриты
Трещиноватость и устойчивость	Высокая трещиноватость, изменчивая устойчивость от слабоустойчивых до устойчивых пород
Металлический состав	Серебро (акантит), галенит, сфалерит
Степень окисления руд	Высокая
Литологический контроль	Благоприятные породы терригенного и вулканогенного происхождения
Метасоматические изменения	Гидротермальные кварц-серицитовые, кварц-хлорит-серицитовые, карбонат-хлоритовые метасоматиты
Стадии метасоматоза	1. Дорудная стадия: пропилитизация (эпидот-хлоритовая, карбонат-хлоритовая фации). 2. Аргиллизация (образование каолинита, серицита). 3. Окварцевание с сульфидизацией (формирование кварцевых жил с сульфидами)
Тектонические особенности	Пересечение Гижигинского, Доктомычанского, Хивачского глубинных разломов, блоковое строение массива
Влияние мерзлоты	Многолетнемерзлые породы мощностью до 300 м, влияющие на трещиноватость и устойчивость
Гидрогеологические условия	Обводненность низкая, слои воды представлены над и под мерзлотой, водоотлив не требуется

Геологическое строение месторождения представлено вулканогенными образованиями верхнего мела и характеризуется двумя основными горизонтами (табл. 2).

При этом метасоматические преобразования во вмещающих породах месторождения Арылах приводят к существенному изменению их горнотехнических характеристик, что важно учитывать при проектировании способов разработки и крепления горных выработок [1–4].

Таблица 2 / Table 2

Геологическое строение месторождения Арылах с включением характеристик по основным горизонтам и стадиям метасоматоза / Geological structure of the Arylyakh deposit, including characteristics of the main horizons and stages of metasomatism

Параметр / Parameter	Значение / Characteristic
Горизонт	Нижний горизонт
Литологический состав	Лавы андезито-дацитового состава
Мощность, м	40–100
Особенности	Вмещающий базовый горизонт
Основные стадии метасоматоза	Проилитизация, аргиллизация, окварцевание с сульфидизацией
Описание стадий	1. Проилитизация: замена минералов пироксенов и плагиоклазов на хлорит, эпидот, карбонаты. 2. Аргиллизация: образование каолинита, серицита, смектитовых минералов. 3. Окварцевание с сульфидизацией: замена кварца, формирование кварцевых жил с включением сульфидных минералов

Анализ влияния стадий метасоматоза на горнотехнические свойства пород месторождения Арылах представлен в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Влияния стадий метасоматоза на горнотехнические свойства / The effect of metasomatism stages on mining and technical properties

Параметр / Parameter	Значение / Characteristic
Стадия метасоматоза	Проилитизация, аргиллизация, окварцевание с сульфидизацией
Основные минералы и изменения	Образование хлорита, эпидота, карбонатов. Формирование каолинита, серицита, смектитов. Замена кварца, формирование кварцевых жил с сульфидами
Влияние на горнотехнические свойства	Усиление поровой структуры, умеренное повышение прочности. Образование рыхлых аргиллитовых зон, снижение прочности. Повышение хрупкости, локальное уплотнение массива
Особенности прочности и устойчивости пород	Средняя устойчивость, возможны зоны средней ломкости. Значительное снижение прочности, повышенная влажность и ломкость. Местами высокая прочность, но с уязвимыми зонами трещиноватости

На ранней стадии проилитизации происходит замена исходных минералов магматического состава (пироксенов, плагиоклазов) на хлорит, эпидот и карбонаты, что обычно

сопровождается умеренным повышением прочности пород за счет цементирующего действия новых минералов. Породный массив становится более пористым, но сохраняет сравнительную устойчивость, что благоприятно сказывается на стабильности горных выработок в зонах проилитизации [3–4].

Стадия аргиллизации характеризуется образованием глинистых минералов: каолинита, серицита и смектитов, которые снижают механическую прочность пород, делают их рыхлыми и склонными к обводнению. В таких зонах существенно повышается вероятность осыпания кровли и стенок выработок, что требует усиленных креплений и проведения дополнительных мероприятий по водоотводу [5–7]. На стадии окварцевания с сульфидизацией происходит образование кварцевых жил и включений сульфидных минералов, что ведет к неоднородности породы. Локально породы приобретают высокую твердость и хрупкость, что усложняет проведение буровзрывных работ и вызывает повышенный риск возникновения микротрещин и локальных обвалов [8–10].

Структурно месторождение контролируется пересечением крупных глубинных разломных систем [11–12] (табл. 4).

Таким образом, комплексное понимание влияния различных стадий метасоматоза на свойства пород позволяет более точно выбирать методы крепления горных выработок, параметры буровзрывных работ и схемы разработки, минимизируя технологические риски и потери полезного компонента [13–14].

Данные разломы оказывают влияние на морфологию рудных тел, которая представлена пятью основными жилами общей протяженностью ~1560 м, с мощностью от 1 до 4 м и крутыми углами падения более 60°. Рудные тела характеризуются сложной кулисовидной морфологией и неоднородной внутренней структурой, обусловленной многоступенчатым процессом рудообразования и тектонокинематикой. Минеральный состав включает кварц, адуляр, карбонаты и серицит как жильные минералы; среди рудных минералов выделяются аргентит, электрум, галенит, сфалерит и халькопирит.

Обсуждение результатов

Анализ горно-геологических условий показал, что сложность отработки обусловлена многолетней мерзлотой толщиной до 300 м, которая стабилизирует массив, но подтаивание от работы техники снижает устойчивость и требует усиленного крепления. Обводненность – низкая, водоотлив не требуется, но температурные колебания создают условия для деформаций массива.

Анализ систем разработки определил, что используемая

Таблица 4 / Table 4

Характеристика основных разломных систем месторождения Арылах / Characteristics of the main fault systems at the Arylyakh deposit

Разломная система / Fault System	Простирание (азимут) / Strike (Azimuth)	Угол наклона / Dip Angle	Влияние на оруденение / Influence on Mineralization	Особенности тектоники / Tectonic Features
Гижигинский разлом	СВ 45–60°	70–85°	Контролирует размещение рудных тел	Глубинный, крутопадающий
Доктомычанский разлом	СЗ 320–340°	60–75°	Определяет блоковое строение массива	Раздробленность пород
Хивачский разлом	С-Ю 350–10°	80–90°	Локализация зон рудоносности	Многоступенчатые разломные нарушения
Верхнеталский разлом	С-Ю 355–5°	75–90°	Главный фактор рудоконтроля	Активная зона деформаций

Таблица 5 / Table 5

Сравнительный анализ предлагаемых технологий с традиционными методами для месторождения Арылах /
Comparative analysis of proposed technologies with traditional methods for the Arylyakh deposit

Показатель / Indicator	Традиционный метод (подэтажная выемка с закладкой, 2023) / Traditional method (sublevel stopping with backfill, 2023)	Внедряемые технологии (камерно-столбовая + подэтажное обрушение) / Implemented technologies (room-and-pillar + sublevel caving)	Обоснование изменений / Justification of changes
Потери руды, %	12–15	7–10	Улучшенная селективность за счет камерно-столбовой системы и лучшего контроля геомеханики массива
Разубоживание, %	15	8–10	Снижение разубоживания при точной выемке и контроле маркшейдерии
Извлечение металлов, %	75–80	85–90	Достигается за счет снижения потерь и улучшения качества сырья
Операционные затраты, млн руб. в год	150	110	Автоматизация, оптимизация процессов и сниженная аварийность снижают затраты
Капитальные затраты, млн руб.	500	600	Высокие вложения в механизацию, цифровизацию, оборудование и крепления
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	6	4,5	Улучшение эффективности и сокращение потерь ускоряют окупаемость инвестиционных затрат
Энергопотребление, кВт·ч/т добычи	20	15	Снижение энергозатрат благодаря автоматизации и улучшенным технологиям
Экологическое воздействие	Среднее	Низкое	Снижение за счет мониторинга мерзлоты, пылеподавления и безопасных систем взрывания
Безопасность производства (относительный индекс)	60	85	Уменьшение аварийных ситуаций и улучшение контроля за горными процессами

подэтажная выемка с закладкой характеризуется большим объемом потерь и разубоживания из-за нестабильности мерзлых пород [13–14]. В связи с этим предлагается оптимизация технологического процесса с переходом к камерно-столбовой системе разработки, сочетающей механизированную крепь, что позволяет повысить стабильность горных массивов и снизить технологические риски. Внедрение системы подэтажного обрушения рассчитано на зоны с пониженной устойчивостью, что обеспечивает дополнительную гибкость управления горным давлением и способствует снижению потерь руды [14–15].

Сравнительный анализ предлагаемых технологий с традиционными методами для месторождения Арылах (на основе имеющихся данных и типовых показателей аналогичных горнодобывающих предприятий) представлен в таблице 5.

Реализация предложенных технологий позволит снизить потери руды на 10–15 %, повысить уровень извлечения металлов, сократить операционные затраты и минимизировать негативное экологическое воздействие на мерзлоту и водные ресурсы.

Закключение

1. Геолого-структурный анализ месторождения Арылах подтвердил его сложный характер, выраженный в неоднородности рудных тел, интенсивной трещиноватости вмещающих пород и масштабном влиянии глубинных разломных систем.
2. Особенности метасоматических преобразований и тектонических нарушений оказывают значительное влияние на устойчивость пород и конфигурацию рудных тел, что требует детального учета при выборе технологий добычи.
3. Адаптация методов разработки с учетом современных горно-геологических условий, таких как многолетняя мерзлота и изменчивость устойчивости массива, позволяет повысить эффективность отработки, снизить потери руды и минимизировать экологические риски.
4. Внедрение камерно-столбовой системы с механизированной крепью, подэтажного обрушения, а также современных цифровых технологий обеспечивает оптимальный баланс между технико-экономическими показателями и безопасностью производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифуллина И.Ю. и др. Анализ устойчивости междуэтажных и междукамерных целиков при камерной системе разработки месторождения «Майское». *Горная промышленность*. 2025; 4: 165–169.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., et al. Analysis of the Stability of Inter-Storey and Inter-Chamber Backs in the Chamber System of Mining at the Maiskoye Deposit. *Mining Industry*. 2025; 4: 165–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-165-169>.

2. Арно В.В., Ломакина Н.Е., Глотова Е.А. Системы разработки Дукатского золотосеребряного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 1 (123): 19–24.
Arno V.V., Lomakina N.E., Glotova E.A. Development Systems of the Dukat Gold-Silver Deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; 1 (123): 19–24. (In Russ.) https://doi.org/10.56195/20793332_2023_1_19_24.

3. Дворник Г.П. Оценка характера связи метасоматических пород и их эдуктов по кислотно-основным свойствам. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017; 2 (46): 53-56.
Dvornik G.P. Assessment of the nature of the connection between metasomatic rocks and their products based on their acid-base properties. *News of the Ural State Mining University*. 2017; 2(46): 53-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-53-56>.
4. Дворник Г.П. Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минерогенез. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020; 1 (57): 63-72.
Dvornik G.P. Types of metasomatic rocks: temperature conditions of formation, composition features, and mineralogy. *News of the Ural State Mining University*. 2020; 1 (57): 63-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-63-72>.
5. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия вузов. Горный журнал*. 2021; 1: 63-73.
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Application of Geoinformation Technologies of Block Modeling for Improving Methods of Estimating the Quality Indicators of Mineral Resources. *News of Universities. Mining Journal*. 2021; 1: 63-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>.
6. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г. и др. Научные аспекты выбора геотехнологической стратегии освоения переходных зон при комбинированной разработке рудных месторождений. *Проблемы недропользования*. 2020; 1: 11-17.
Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., et al. Scientific Aspects of Choosing a Geotechnological Strategy for Developing Transition Zones in Combined Ore Deposits. *Problems of Subsoil Use*. 2020; 1: 11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.01.011>.
7. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений. Екатеринбург, 2021: 360.
Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Methodology for selecting underground geotechnology in combined development of ore deposits. Yekaterinburg, 2021: 360. (In Russ.).
8. Яковлев А.М. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 5-1: 258-268.
Yakovlev A.M. Planning of mining operations in the mode of raw material quality management based on geoinformation modeling. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 5-1: 258-268. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258.
9. Яковлев В.Л. Методологические основы стратегии инновационного развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; 5-1: 6-18.
Yakovlev V.L. Methodological Foundations of the Strategy for Innovative Development of Mining and Engineering Systems in the Development of Deep-Seated Deposits. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 5-1: 6-18. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/02_36_1493_2021_51_0_6.
10. Яковлева В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2022; 1S: 34-45.
Yakovleva V.L. The main stages and results of research on the development of methodological foundations for the strategy of development of mining systems in the development of deep-seated deposits of solid minerals. *Mining Industry*. 2022; 1S: 34-45. (In Russ.).
11. Balt K., Goosen R.L. MSAHP: An approach to mining method selection. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020; 120 (8): 451-460. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1072/2020>.
12. Djezzar S., Rasouli V., Boualam A., et al. An integrated workflow for multiscale fracture analysis in reservoir analog. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020; 13(1): 161. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5085-6>.
13. Huang P., Spearing S., Ju F., et al. Control effects of five common solid waste backfilling materials on in situ strata of gob. *Energies*. 2019; 12 (1):154. <https://doi.org/10.3390/en12010154>.
14. Nelis G., Morales N., Widzyk-Capehart E. Comparison of different approaches to strategic open-pit mine planning under geological uncertainty. *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018*. Berlin, 2019: 95-105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_8.
15. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*. 2020; 15: 0232640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232640>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –
канд. техн. наук, доцент, Северо-Восточный
государственный университет, Политехнический
институт, 685000, г. Магадан Российская Федерация;
e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –
студентка направления подготовки «Государственный
и муниципальный аудит», ВШЭ МГУ имени М. В.
Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация

Ирина Юрьевна Гарифуллина –
старший преподаватель кафедры геологии и горного
дела. Северо-Восточный государственный
университет, Политехнический институт, 685000, г.
Магадан, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Northeastern State
University, Polytechnic Institute, 685000, Magadan, Russian
Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko –
student of the field of training "State and Municipal Audit",
Higher School of Economics, Lomonosov Moscow State
University, 119991, Moscow, Russian Federation

Irina Yu. Garifulina –
Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining.
Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685000,
Magadan, Russian Federation

Наталья Евгеньевна Ломакина –
старший преподаватель кафедры горного дела,
Северо-Восточный государственный университет,
Политехнический институт, 685000, г. Магадан,
Российская Федерация

Евгений Сергеевич Семыкин –
старший преподаватель кафедры горного дела,
Северо-Восточный государственный университет,
Политехнический институт, 685000, г. Магадан,
Российская Федерация

Критерии авторства:

В. В. Арно, Е. П. Колесниченко – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; Е. С. Семыкин, И. Ю. Гарифулина – оценка результатов и коррекция написанной работы; Н. Е. Ломакина – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2025

Поступила после рецензирования: 21.09.2025

Принята к публикации: 04.10.2025

Natalia E. Lomakina –
senior lecturer of the Mining Department, Northeastern State
University, Polytechnic Institute, 685000, Magadan, Russian
Federation

Evgeny S. Semykin –
Senior Lecturer at the Department of Mining, North-Eastern
State University, Polytechnic Institute, 685000, Magadan,
Russian Federation

Contribution:

V. V. Arno, E. P. Kolesnichenko – the idea of research, formulation of the conflict of the current paradigm and new facts, writing a scientific paper; E. S. Semykin, I. Yu. Garifulina – evaluation of the results and correction of the written work; N. E. Lomakina – selection and collection of material for research.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 15.09.2025

Revised: 21.09.2025

Accepted: 04.10.2025

Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении

Б. Н. Бухтояров^{1✉}, О. Р. Старикова¹, А. А. Виноградова²

¹ООО «Газпром нефть шельф», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: Продуктивность нефтегазовых скважин обеспечивается достижением геологических целей бурения и оптимальным размещением продуктивной части ствола в коллекторе. Соответственно, повышение точности проводки скважин и определение их фактических траекторий является одной из фундаментальных задач при бурении на нефть и газ. Магнитные элементы буровой колонны могут вносить существенные искажения в показания магнитометра оси Z телесистемы MWD и являются одной из основных причин азимутальных ошибок. В статье сделан акцент на способах компенсации влияния магнитных помех буровой колонны, рассмотрены основные методы устранения внешнего магнитного влияния на замеры телесистемы: аппаратные меры, одностанционная коррекция, многостанционный анализ и их ограничения. Показано, что в ряде случаев применение описанных методов позволяет существенно скорректировать траекторию и приблизить магнитную съемку к точности гироскопических исследований. Приведены данные о результатах MSA-коррекции траекторий скважин с оценкой отклонения «сырых» и скорректированных траекторий относительно гироскопических замеров. Статья является продолжением публикаций в журнале «Маркшейдерия и недропользование» (2025, № 3 и 4), посвященных общему описанию маркшейдерского контроля положения скважин и использованию геомагнитных данных в нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: буровая колонна, осевая интерференция, кросс-осевая интерференция (DSI), немагнитные утяжеленные буровые трубы (НУБТ), метод короткого НУБТ, многостанционный анализ (MSA)

Для цитирования: Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Виноградова А.А. Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):55-67. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-55-67>.

Correction of well azimuth in directional drilling

B. N. Bukhtoyarov^{1✉}, O. R. Starikova¹,
A. A. Vinogradova²

¹Gazprom Neft Shelf LLC, St. Petersburg, Russian Federation

²St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The productivity of oil and gas wells is ensured by achieving geological drilling objectives and the optimal placement of the productive wellbore section within the reservoir. Accordingly, improving the accuracy of well placement and determining their actual trajectories is a fundamental task in oil and gas drilling. Magnetic elements of the drill string can introduce significant distortions into the readings of the Z-axis magnetometer of the MWD (Measurement While Drilling) telemetry system and are one of the primary causes of azimuth errors. The article focuses on compensating for the magnetic interference from the drill string. It reviews the main methods for eliminating external magnetic influence on telemetry system measurements—hardware measures, single-station correction, multi-station analysis (MSA)—and their limitations. It is shown that in a number of cases, the application of these correction methods allows for significant trajectory adjustment and brings the accuracy of the magnetic survey closer to that of gyroscopic surveys. Data on the results of MSA correction of well trajectories are provided, with an assessment of the ‘raw’ and corrected trajectories relative to gyroscopic surveys. This article is a continuation of publications in issues No. 3 and No. 4, 2025, of the journal “Mine Surveying and Subsurface Use”, dedicated to the general description of mine surveying well position control and the use of geomagnetic data in the oil and gas industry.

Keywords: axial interference of the drill string, cross-axial drill string interference (DSI), non-magnetic drill collars (NDC), Short Collar Correction (SSC), short NDC method, multi-station analysis (MSA)

For citation: Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Vinogradova A.A. Correction of well azimuth in directional drilling. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):00-00. <https://doi.org/>

Введение

Большая пространственная неопределенность скважин является серьезной проблемой при разработке нефтегазовых месторождений. К ее основным негативным последствиям можно отнести недостижение геологических целей бурения и невозможность бурения скважин нужной длины из-за рисков столкновения с ранее пробуренными скважинами.

Специалисты отрасли понимают, что существует прямая связь между точностью пространственного положения скважин и их продуктивностью. Низкая точность траекторий ведет к потерям нефти и снижению экономической эффективности проектов. Поскольку задача обеспечения соответствия положения горных выработок проекту возложена на маркшейдерские службы, поиск путей повышения точности определения пространственно-геометрических параметров скважин должен стать одним из ключевых приоритетов их деятельности.

Основной вклад в пространственную неопределенность траекторий при бурении с помощью телесистем (MWD) вносят систематические ошибки измерений. Поскольку эти погрешности суммируются от замера к замеру, максимальная неопределенность формируется на забое скважины. При этом доминирующей является латеральная (боковая) составляющая, которая напрямую связана с систематическими ошибками определения магнитного азимута.

Главными источниками этих ошибок являются:

1. Неопределенность магнитного поля Земли.
2. Магнитное влияние буровой колонны на показания магнитометров забойной телесистемы.

Статья является продолжением публикаций в журнале «Маркшейдерия и недропользование», № 3 [1] и 4 [2] за 2025 год, посвященных общему описанию маркшейдерского контроля положения скважин и использованию геомагнитных данных в нефтегазовой отрасли. Меры по снижению влияния первого фактора подробно рассмотрены авторами в публикации [2].

Настоящее исследование сфокусировано на втором, не менее значимом источнике ошибок. Магнетизм буровой колонны может вносить критические погрешности в замеры телесистемы, известны случаи искажения магнитного азимута более чем на 15° . Несмотря на то, что это влияние достаточно хорошо изучено, и в отрасли применяются как аппаратные методы его снижения, так и математические алгоритмы коррекции замеров, проблема не теряет актуальности.

Цель исследования: анализ применяемых в отрасли методов снижения магнитного влияния буровой колонны на измерения азимута для повышения точности траекторий.

Материал и методы исследования

Для проведения исследования в соответствии с заявленной целью выполнен анализ источников, в том числе документов «Сообщества инженеров-нефтяников» (SPE), описывающих методы расчета азимута скважины при наклонно-направленном бурении с помощью телесистем MWD, источники и виды магнитной интерференции, ее влияние на скважинные замеры. Рассмотрены применяемые аппаратные

и математические способы снижения влияния магнитных помех на измерения MWD. Проанализированы существующие алгоритмы коррекции влияния буровой колонны и особенности их применения. С целью исследования в среде MS Excel реализованы алгоритмы одностанционной и многостанционной коррекции, с помощью которых выполнены расчеты траекторий по 15 наклонно-направленным скважинам. Проведен анализ результатов коррекции со сравнением траекторий, построенных до и после коррекции, с траекториями, выполненными на основе гироскопических измерений. Сделаны выводы и предложения по дальнейшему применению методик коррекции скважинных замеров в практике маркшейдерского обеспечения буровых работ.

Метод магнитной съемки

Для понимания источников азимутальных ошибок необходимо рассмотреть сам принцип магнитной съемки во время бурения – основного способа контроля траектории скважин.

Направление ствола скважины при съемке рассчитывают относительно опорных векторов: гравитационного поля Земли G , и магнитного поля Земли B , [3]. При измерениях определяют глубину скважины по стволу (MD), зенитный угол I и магнитный азимут A ¹.

Зенитный угол представляет собой угол между продольной осью скважины и вектором гравитационного поля G , направленным к центру масс Земли, вектор имеет положительное значение в направлении «вниз».

Магнитный азимут представляет собой угол между проекцией на горизонтальную плоскость продольной оси буровой колонны и горизонтальной компонентой вектора магнитного поля Земли. В северном полушарии полный вектор магнитного поля B , имеет наклон под углом D (угол магнитного склонения) ниже горизонта и положителен в направлении «на север».

Для определения зенитного угла и магнитного азимута в процессе бурения используют забойные телесистемы, которые размещаются внутри немагнитной секции КНБК как можно ближе к долоту. Телесистемы оснащены шестью датчиками: тремя магнитометрами и тремя акселерометрами. Передачу результатов замеров на устье скважины обеспечивает канал связи. Акселерометры служат для определения направления скважины относительно отвесной линии (направления силы тяжести), магнитометры – для определения направления скважины относительно магнитного севера.

Магнитометры ориентированы взаимно ортогонально по осям X , Y и Z , датчики оси Z соосны с направлением скважины (рис. 1а). Также ориентированы оси акселерометров. TF (tool face) – угол поворота телесистемы вокруг оси Z дает представление о направлениях осей X и Y в момент взятия замера. Когда ось Y совпадает с проекцией вертикального направления ствола скважины «вверх» в плоскости перпендикулярной оси инструмента, угол TF (tool face) равен 0 (рис. 1б).

¹ Здесь и далее по тексту под азимутом (A) понимается магнитный азимут.

Следует учитывать, что на сегодняшний день в отрасли отсутствуют жесткие стандарты наименования осей, выше приведенные сведения представляют собой наиболее распространенный вариант, однако в каждом конкретном случае необходимо уточнить у поставщика услуги наклонно-направленного бурения ориентацию осей в применяемой телесистеме.

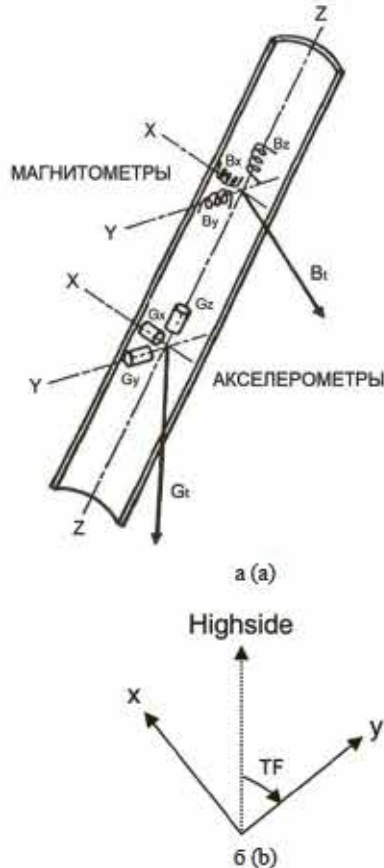


Рис. 1. Ориентация осей телесистемы MWD (а) и угол поворота инструмента (tool face) относительно «высокой стороны» (highside) (б) / Fig. 1. Orientation of the axes of the MWD telesystem (a) and the angle of rotation of the tool face relative to the "high side" (b)

В результате замеров MWD на станциях съемки по стволу скважины получают необходимые для расчета угловых параметров данные:

MD – длина по стволу скважины;

B_x, B_y, B_z – замеры магнитометров;

G_x, G_y, G_z – замеры акселерометров.

Используя замеры по всем 6 осям, вычисляют азимут (A) скважины на каждой станции съемки:

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{G_t(B_y G_x - B_x G_y)}{B_z(G_x^2 + G_y^2) - G_z(G_x B_x + G_y B_y)} \right) \quad (1)$$

где полное значение вектора гравитации G_t :

$$G_t = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (2)$$

Для расчета зенитного угла (I) используют только замеры акселерометров:

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{G_x^2 + G_y^2}}{G_z} \right) \quad (3)$$

Угол поворота инструмента вокруг оси Z – TF рассчитывается по формуле²

$$TF = \tan^{-1} \left(\frac{-G_x}{-G_y} \right) \quad (4)$$

Погрешности датчиков акселерометров и магнитометров ϵ_g и ϵ_b приводят к неточности измерений и, соответственно, погрешности в азимуте. Эти погрешности могут быть оценены как

$$\begin{aligned} \delta A_g &= \epsilon_g \left[\left(\frac{\partial A}{\partial G_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial G_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial G_z} \right)^2 \right]^{0.5} = \\ &= \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_g}{G} \left(\frac{B_x^2}{B_h^2} + \frac{1}{\tan^2 I} - 2 \cdot \frac{B_y \cos A}{B_h \tan I} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta A_b = \epsilon_b \left[\left(\frac{\partial A}{\partial B_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B_z} \right)^2 \right]^{0.5} = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_b}{B_h} \quad (6)$$

где $B_h = (B_x^2 + B_y^2)^{0.5}$ – горизонтальная составляющая вектора магнитной индукции;

$B_z = B_v$ – вертикальная составляющая вектора магнитной индукции;

G_t – значение силы тяжести;

A – азимут скважины;

I – зенитный угол скважины;

δA_g – ошибка азимута, обусловленная погрешностью акселерометров;

δA_b – ошибка азимута, обусловленная погрешностью магнитометров.

Ошибки акселерометра и магнитометра не коррелированы между собой, поэтому общая погрешность по азимуту, обусловленная погрешностью датчиков, составляет

$$\delta A = (\delta A_g^2 + \delta A_b^2)^{0.5} \quad (7)$$

Как видно из приведенных формул, погрешность определения азимута существенно зависит от точности измерения фактических параметров магнитного и гравитационного поля. Гравитационное поле хорошо изучено и стабильно, магнитное поле, напротив, подвержено вариациям и внешним помехам. Таким образом, любые внешние помехи, искажающие геомагнитное поле в точке замера, оказывают прямое влияние на итоговую точность построения траектории.

Магнитная интерференция

Магнитная интерференция при измерениях в скважинах – это нежелательное искажение измеряемого вектора магнитного поля Земли, вызванное воздействием внешних магнитных полей. Эти поля накладываются на естественное геомагнитное поле и приводят к ошибкам в определении ориентации скважины.

Основными источниками интерференции являются:

– намагниченные элементы буровой колонны: стальные трубы, стабилизаторы, переводники, забойные двигатели и др., находящиеся выше или ниже телесистемы;

– соседние скважины – обсадные колонны близлежащих скважин, особенно при кустовом или уплотняющем бурении;

² В зависимости от направлений осей в телесистеме знаки числителя и знаменателя могут быть изменены.

- горные породы – железосодержащие горные породы могут создавать локальные магнитные аномалии;
- внешние геомагнитные возмущения: магнитные бури и струйные авроральные электроток;
- техногенные объекты поверхности: металлические объекты на поверхности или морском дне;
- намагниченный буровой раствор – добавки на основе железа (гематит, магнетит).

В целом магнитная интерференция – это «магнитный шум», который мешает телесистеме MWD точно определить направление на север, что может привести к ошибкам в проводке скважины, отклонению от проектных траекторий, недостижению геологических целей бурения, а также к рискам столкновения скважин в условиях высокой плотности бурения. Магнитное влияние на замеры MWD является одной из проблем отрасли, заслуживающей серьезного рассмотрения.

По влиянию на телесистему различают:

- осевую интерференцию (axial) – помеху, направленную вдоль продольной оси Z буровой колонны (в первую очередь влияет на показания Z магнитометра);
- поперечную интерференцию (cross-axial) – помеху, действующую перпендикулярно оси скважины, вдоль осей X и Y .

Осевая магнитная интерференция

Намагниченность компонентов буровой колонны связана с ее вращением, нагрузками и напряжением в магнитном поле Земли. Магнитные полюса образуются вблизи оконечностей каждого элемента. Каждый полюс создает поле ошибки на датчике, пропорциональное его силе и обратно пропорциональное квадрату расстояния от датчика. Сила магнитного полюса P равна магнитному потоку, который входит или выходит из него, и выражается в веберах (B_e).

Магнитные компоненты буровой колонны могут также иметь индуцированную намагниченность, возникающую под влиянием магнитного поля Земли. Индуцированная осевая намагниченность, связанная с компонентами буровой колонны, обычно мала по сравнению с постоянной намагниченностью.

Поскольку магнитные компоненты буровой колонны обычно расположены на расстоянии не менее нескольких метров в осевом направлении от датчиков, поля ошибок, вызванные постоянной намагниченностью, направлены по оси Z . Поэтому поле ошибок эквивалентно ошибке смещения показаний Z -магнитометра.

В результате смещения магнитных полюсов от оси магнитных элементов, изгиба буровой колонны или присутствия намагниченных участков в немагнитных элементах эффект влияния на поперечные магнитометры X и Y также может присутствовать, но кросс-осевая (поперечная) интерференция обычно на порядок меньше осевой.

Эффект осевого поля обычно заключается в увеличении расчетного азимута A , если скважина направлена на запад, или в его уменьшении, если скважина направлена на восток. В любом случае осевая помеха ведет к смещению расчетного местоположения забоя к северу, это типичный случай для скважин, расположенных в северном полушарии.

Предполагается, что поле ошибок (B), фиксируемое датчиками, представляет собой сумму вкладов от всех полюсов

$$B(r) = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (8)$$

где r – расстояние до источника помехи.

Для снижения магнитного влияния элементов КНБК на магнитометры забойная телесистема размещается в немагнитном участке буровой колонны: немагнитной утяжеленной буровой трубе (НУБТ), поле ошибок вызывается магнитными элементами выше и ниже этого участка и ориентировано в осевом направлении. В типовой компоновке низа буровой колонны учитывают три полюса: один – над верхней оконечностью НУБТ, второй – под нижней и третий – в самом низу винтового забойного двигателя – долото. Все вместе они создают магнитное поле помех ΔB_z , для расчета их суммарного эффекта используется формула [4]

$$\Delta B_z(z) = \frac{|P_U|}{4\pi(L-z)^2} + \frac{|P_L|}{4\pi z^2} + \frac{|P_D|}{4\pi(z+L_{BIT})^2} \quad (9)$$

где $|P_U|$ и $|P_L|$ – модули силы полюсов, соответственно выше и ниже НУБТ;

L – длина НУБТ, м;

$L-z$ и z – расстояние от верха и низа НУБТ до магнитометров телесистемы;

L_{BIT} – длина участка буровой колонны ниже НУБТ.

Используя приведенную формулу, можно определить такое расстояние z от низа буровой колонны, при котором ΔB_z будет минимальной, именно там должны быть размещены магнитометры. Такой расчет выполняется на стадии проектирования КНБК на основе моделей или паспортных данных намагниченности элементов.

В работе SPE 11382 [4] приводятся следующие данные полевых замеров значений сил полюсов для типового скважинного оборудования:

- трубы выше НУБТ $> +9 \cdot 10^4 B_e$;
- стабилизатор $> -9 \cdot 10^5 B_e$;
- 10 м трубы ниже НУБТ $> -3 \cdot 10^4 B_e$;
- винтовой забойный двигатель (ВЗД) $> -1 \cdot 10^3 B_e$.

Указанные значения авторы [4] относят к консервативным оценкам. Следует также отметить, что показанная трехполюсная модель является упрощением, но она достаточно точна для большинства практических случаев.

Ошибка азимута ΔA , возникающая из-за интерференции буровой колонны, определяется по формуле

$$\Delta A = \frac{\sin I \cdot \sin A \cdot \Delta B_z}{\cos(Dip) \cdot |B|} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (10)$$

где I – зенитный угол скважины;

A – магнитный азимут;

Dip – наклонение магнитного поля Земли в районе работ;

$|B|$ – значение полного вектора магнитной индукции магнитного поля Земли в районе работ;

$\cos(Dip) \cdot |B|$ – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли;

ΔB_z – смещение показаний B_z из-за магнитной интерференции.

При проектировании КНБК необходимо учитывать, что ошибка азимута ΔA , связанная с осевой магнитной интерференцией, не должна превышать $0,5^\circ$.

Из уравнения 10 следует, что ошибка азимута возрастает:

- по мере приближения скважины к восточному и западному магнитным направлениям;
- при увеличении зенитного угла;
- по мере увеличения северной широты района работ, так

как угол магнитного наклонения увеличивается в северных широтах, а горизонтальная компонента при этом снижается.

Из изложенного следует, что магнитное влияние буровой колонны является систематической погрешностью, требующей специальных мер по снижению ее негативного влияния на точность азимута. К таким мерам можно отнести аппаратные меры магнитной изоляции телесистемы и методики коррекции замеров: одностанционную коррекцию и многостанционный анализ.

Кросс-осевая магнитная интерференция

Как уже было отмечено выше, кросс-осевая интерференция проявляется в искажении замеров магнитометров по осям X и Y , перпендикулярным направлению скважины и оси Z .

Источниками этого типа интерференции может быть недостаточная магнитная изоляция от влияния КНБК, «горячие точки» НУБТ (локальные намагниченные участки, которые могут появляться в процессе эксплуатации) и обсадные колонны соседних скважин. Также магнитный экранирующий эффект может оказывать намагниченность буровых растворов, особенно в таких положениях скважин, в которых раствор распределен вокруг КНБК неравномерно, например при провисании компоновки в горизонтальных участках. Эффекты негативного влияния намагниченности буровых растворов на замеры MWD подробно рассмотрены в работах SPE 71400 [5], SPE-195600-MS [6].

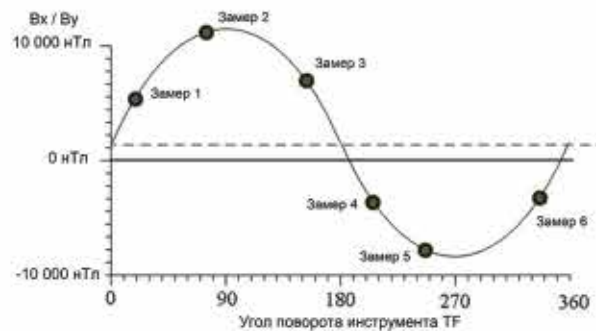
В отличие от оси Z влияние элементов КНБК на поперечные магнитометры осей X и Y значительно меньше, но в целом кросс-осевая интерференция также критична для расчета азимута, поскольку его значение напрямую зависит от горизонтальных компонентов магнитного поля B_x и B_y , ошибки в них могут привести к значительным отклонениям траектории ствола скважины.

Еще одной проблемой кросс-осевой интерференции являются ошибки положения инструмента относительно оси скважины – при навигационном бурении ориентация инструмента зависит от данных поперечных магнитометров и акселерометров.

Измерения, подверженные поперечному влиянию, могут не соответствовать критериям контроля качества (QC) по значениям полного магнитного поля B_{tot} или углу магнитного наклонения Dip_{ref} , что требует применения корректирующих алгоритмов или отбраковки замеров.

Ключевую роль при диагностики кросс-осевой интерференции играет периодическое проведение ролл-тестов, которые заключаются в выполнении серии замеров на постоянной глубине MD с изменением угла вращения телесистемы TF вокруг оси скважины. При выполнении ролл-теста измерения должны проводиться во всех четырех квадрантах, взятие шести замеров в разных ориентациях, как правило, полностью обеспечивает выполнение этого условия. Поскольку значение показаний магнитометров по осям X и Y зависит от их текущего направления в магнитном поле Земли, то изменение их направления при вращении относительно оси скважины должно привести к изменению измеряемых величин B_x или B_y по синусоиде или создавать на графике окружность с центром в начале декартовой системы координат. На рисунке 2 показан результат ролл-теста из шести замеров, смещение центральной линии синусоиды относительно нулевого значения свидетельствует о наличии кросс-осевой интерферен-

ции, а величина смещения показывает масштаб проблемы. В таблице на рисунке 2 показано изменение значения азимута A в точке замера в зависимости от поворота телесистемы вокруг оси.



№ замера	MD	INC	A	TF
1	850.34	30.24	315.67	18.32
2	850.33	30.20	322.45	70.67
3	850.33	30.27	319.25	150.34
4	850.34	30.22	316.87	211.41
5	850.33	30.28	321.92	247.69
6	850.33	30.25	317.48	343.52

Рис. 2. Результат ролл-теста. Кросс-осевая интерференция /
Fig. 2. The result of the roll test. Cross-axial interference

Предельных стандартизованных значений такого смещения не существует, операторы разработки и подрядчики по ННБ самостоятельно устанавливают его величину. Так, в умеренных широтах ориентируются на значение в 100 нТл, в северных широтах – до 150 нТл.

При выявлении значительной кросс-осевой интерференции необходимо выяснить ее причины, в первую очередь нужно обратить внимание на следующие обстоятельства:

- исправность телесистемы;
- наличие поблизости соседних скважин;
- наличие «горячих точек» на НУБТ;
- достаточность магнитной изоляции телесистемы;
- локальную намагниченность горных пород;
- намагниченность бурового раствора.

Умеренная кросс-осевая интерференция может быть скомпенсирована при помощи многостанционного анализа, при высокой – необходимо устранить источник помехи. Меры по исключению или снижению влияния кросс-осевой интерференции необходимо выбирать в соответствии с выявленными причинами и только после этого продолжать бурение. Если причина неустранима, например это обсадная колонна соседней скважины, необходимо применять гироскоп.

Для снижения влияния осевых и поперечных магнитных помех на измерения в отрасли используют следующие меры:

- *аппаратные*: магнитная изоляция датчиков MWD от внешних полей;
- *операционные*: проведение ролл-тестов и процедур контроля качества (QC) для обнаружения и отбраковки данных, полученных в условиях помех;
- *математические*: применение специальных алгоритмов одностанционной коррекции (SCC) и многостанционного анализа (MSA);
- *технологические*: использование гироскопических измерительных систем в условиях, где магнитные помехи неустранимы.

Аппаратные меры магнитной изоляции телесистемы

Аппаратная компенсация – это первая и обязательная мера защиты телесистемы от магнитного влияния бурильной колонны и недопущения возникновения азимутальных ошибок.

В отрасли используются следующие аппаратные меры:

– использование НУБТ и немагнитных элементов КНБК.

Суть метода заключается в увеличении расстояния между магнитометрами и источниками магнитных помех до приемлемого уровня. Это наиболее распространенное решение;

– применение активных систем компенсации: электромагнитных катушек или систем. Принцип их работы основан на измерении поля помех и генерации компенсирующего поля противоположного направления с помощью системы электромагнитов, управляемой бортовым процессором. Активные системы обладают высокой точностью компенсации, но, как правило, дороги и сложны в эксплуатации;

– применение магнитных экранов. Экран захватывает магнитное поле и пропускает его по себе, создавая замкнутый путь и не позволяя ему проходить через защищаемое устройство. В качестве материалов обычно используются сплавы на основе никеля (пермаллой), обладающие высокой магнитной проницаемостью в слабых полях. Экраны эффективно снижают помехи, но дороги и громоздки, поэтому применяются редко.

Использование НУБТ является одним из ранних, но в то же время простым и надежным решением, стандартно применяемым в настоящее время для обеспечения магнитной изоляции датчиков телесистемы.

Для снижения до приемлемого уровня магнитного влияния КНБК на телесистему использования одной стандартной 9-метровой НУБТ чаще всего недостаточно. Методика расчета длины НУБТ приводится в статье SPE 11382 [4]. Для расчета необходимой длины НУБТ ранее использовались специальные номограммы, учитывающие географическое положение района работ, зенитный угол и магнитный азимут скважины. Так, в соответствии с методикой расчета, длина НУБТ в районе Северного моря для скважины с зенитным углом 60° и азимутом 60° должна составлять более 40 метров (рис. 3).

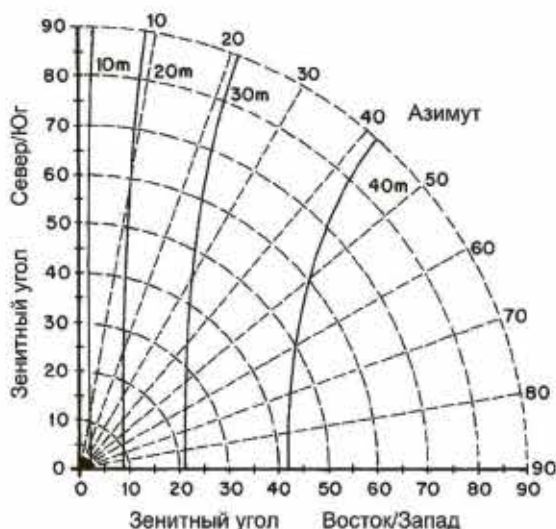


Рис. 3. Пример номограммы для расчета длины немагнитных утяжеленных буровых труб /
Fig. 3. An example of a nomogram for calculating the length of non-magnetic drill collars NDC

В настоящее время для расчетов магнитного влияния элементов КНБК на телесистему используется специализированное программное обеспечение.

Стандартная реализация аппаратных мер выглядит так:

1. На этапе проектирования КНБК рассчитывается необходимая длина немагнитного участка исходя из используемого оборудования, геометрических параметров скважины, местных параметров геомагнитного поля и свойств используемых труб.

2. В состав КНБК включаются немагнитные УБТ расчетной длины.

3. MWD-инструмент размещается внутри этой немагнитной секции.

4. Если остаточная погрешность все еще превышает допуски, применяются математические методы коррекции.

К преимуществам применения НУБТ можно отнести:

- отсутствие необходимости сложных вычислений;
- надежность метода на физическом уровне;
- возможность применения методов математической коррекции остаточной интерференции.

К недостаткам относятся:

- увеличение стоимости КНБК;
- увеличение длины и жесткости нижней части КНБК;
- удаление телесистемы от забоя скважины, что снижает точность проводки скважины;
- вероятность остаточных помех в северных широтах;
- необходимость более аккуратного обращения с бурильной колонной: прочность НУБТ ниже, чем у стандартных буровых труб, поэтому увеличение длины НУБТ повышает риск обрыва КНБК и потери дорогостоящего оборудования в скважине.

Обозначенные выше недостатки в некоторых случаях являются серьезным технологическим препятствием для бурения наклонно-направленных скважин. Для снижения этих ограничений в отрасли используется все больше элементов КНБК в немагнитном исполнении – это стабилизаторы, переводники, геофизические приборы каротажа. Также были разработаны меры математической коррекции измерений, позволяющие использовать более короткие НУБТ.

Математические методы коррекции

Как было показано выше, для обеспечения наибольшей точности измерений магнитного поля телесистема обычно размещается в немагнитной секции КНБК – НУБТ, окружающие телесистему элементы также могут быть изготовлены из немагнитного материала. Тем не менее НУБТ и немагнитные элементы могут намагничиваться во время буровых работ до такой степени, что точность измерений магнитного поля снижается до неприемлемых значений и не может соответствовать критериям контроля качества.

Для сокращения длины НУБТ и устранения осевого влияния приобретенной намагниченности немагнитных элементов используют различные алгоритмы математической коррекции замеров датчиков телесистемы, которые позволяют компенсировать ошибки, имеющие различные источники.

Эти алгоритмы могут использовать известные параметры магнитного поля, основываться на данных, полученных от одиночных замеров, или на статистическом анализе измерений на разных глубинах и с разной ориентацией инструмента.

Методы одностанционной коррекции в первую очередь направлены на компенсацию осевой интерференции. Преимуществом методов одностанционной коррекции является их робастность на основании одиночного замера, то есть они начинают работать сразу, и нет необходимости накопления представительной выборки. Однако многостанционные алгоритмы позволяют более точно компенсировать как осевую, так и поперечную магнитную интерференцию, а также устранять погрешности измерений акселерометров. Кроме этого, многостанционный анализ является мощным инструментом контроля качества замеров MWD и оценки используемых геомагнитных моделей.

Одностанционная коррекция

Методы одностанционной коррекции были разработаны одновременно с внедрением твердотельных забойных теле-систем в конце 1970-х – начале 1980-х годов, их совершенствование продолжается по настоящее время [7, 8].

Используя известные параметры опорного магнитного поля, измерения акселерометров и принимая измерения магнитометров по осям X и Y как истинные, значение магнитометра по оси Z может быть рассчитано теоретически. После этого расчет азимута выполняется с использованием скорректированного значения Z -магнитометра. Коррекция по оси Z обеспечивает достоверность показаний по азимуту, когда магнитные параметры выходят за пределы референсных значений из-за интерференции буровой колонны.

Простейший вариант определения теоретического значения магнитометра по оси Z – метод векторных сумм – использует уравнение полного модуля поля B_t :

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (11)$$

$$B_z = \sqrt{B_t^2 - B_x^2 - B_y^2} \quad (12)$$

Таким образом, величина B_z вычисляется из референсного значения B_t и измеренных B_x и B_y .

При зенитных углах, близких к горизонтальным, могут появляться двойственные решения значения B_z . Верное значение может быть найдено при подстановке в формулу расчетного значения B_z и сравнения полученного значения Dip с референсным значением Dip_{ref} :

$$Dip = \tan^{-1} \left[\frac{B_x G_x + B_y G_y + B_z G_z}{\sqrt{(G_y B_z - G_z B_y)^2 + (G_x B_z - G_z B_x)^2 + (G_y B_x - G_x B_y)^2}} \right] \quad (13)$$

Другой вариант определения осевой компоненты использует два ожидаемых значения: B_{z1} – для модуля полной индукции магнитного поля $B_{t_{ref}}$ и B_{z2} – для магнитного наклона Dip_{ref} взятых из опорной геомагнитной модели. Значение B_{z1} вычисляется методом векторных сумм из B_t . Значение B_{z2} рассчитывается для обеспечения наилучшего соответствия референсному углу магнитного наклона. Используя Dip_{ref} измерения акселерометров и поперечных магнитометров B_x и B_y , значение B_{z2} определяют с помощью приведенной выше формулы расчета Dip . Решение находится путем итерационной процедуры подбора наилучшего соответствия.

Затем из полученных B_{z1} и B_{z2} вычисляют итоговое взвешенное значение B_{ze} , которое представляет наилучшее решение для осевой компоненты магнитного поля:

$$B_{ze} = \frac{C_1 \cdot B_{z1} + C_2 \cdot B_{z2}}{C_1 + C_2} \quad (14)$$

где C_1 и C_2 – весовые коэффициенты, обратно пропорциональные неопределенности B_{z1} и B_{z2} соответственно, метод подробно описан в патенте США № 5452518³.

Еще один итерационный алгоритм – метод короткого НУБТ – описан в патентах США № 4163324⁴ и 33708⁵.

Алгоритм заключается в циклическом уточнении азимута A и значения осевой компоненты B_z до достижения сходимости решения:

1) сперва вычисляют начальный азимут A_0 с использованием поперечных осей магнитометров, акселерометров и параметров исходного геомагнитного поля по формуле

$$A_0 = \frac{-(B_x \sin TF + B_y \cos TF) \cos I}{(B_x \cos TF - B_y \sin TF) + B_z \sin I} \quad (15)$$

где TF – угол поворота инструмента вокруг оси, равный $G_y / (-G_x)$;

B_y – вертикальная составляющая опорного геомагнитного поля;

I – зенитный угол.

2) значение B_z определяют по формуле

$$B_z = B_h \cos A_0 \sin I + B_v \cos I \quad (16)$$

где B_h – горизонтальная составляющая опорного геомагнитного поля;

3) далее азимут вычисляют по формуле

$$A_i = \frac{-(B_x \sin TF + B_y \cos TF)}{\cos I (B_x \cos TF - B_y \sin TF) + B_z \sin I} \quad (17)$$

4) затем повторяют вычисление значения B_z по формуле из пункта 2, заменяя A_0 на A_i , и далее вычисляя A_{i+1} по формуле из пункта 3.

5) итерации по пунктам 2 и 3 выполняют до тех пор, пока изменение азимута между итерациями не будет менее $0,0001^\circ$.

Разные производители программного обеспечения могут использовать собственные алгоритмы коррекции, которые чаще всего решают задачу поиска оптимального баланса соответствия значения B_z модулю B_t и наклону Dip .

На рисунке 4 (см. вкл. на стр. 38) показан принцип подбора значения B_z , обеспечивающего наилучшее соответствие полному полю B_t и углу наклона Dip .

Методы одностанционной коррекции имеют ограничения, связанные с направлением скважины относительно вектора магнитного поля Земли и особенностями алгоритма. Точность опорной геомагнитной модели критически важна для результатов коррекции, особенно в сложных ориентациях.

По мере увеличения зенитного угла и приближении к направлениям восток/запад одностанционная коррекция теряет

³ DiPersio R.D. Method of correcting for axial error components in magnetometer readings during wellbore survey operations // Patent No.US5452518A. Date of Patent: 26.09.1995.

⁴ Russell M.K., Russell A.W. Surveying of boreholes // Patent No.U.S4163324A. Date of Patent: 07.08.1979.

⁵ Roesler R.F. Surveying of boreholes using shortened non-magnetic collars // Patent No.USRE33708E. Date of Patent: 08.10.1991.

свою точность. Это связано с тем, что в этих направлениях инструмент ориентирован практически перпендикулярно магнитному меридиану, влияние интерференции становится максимальным, что делает алгоритм коррекции неэффективным и неустойчивым. По этой причине методы одностанционной коррекции имеют строго определенные зоны исключения (no-go zones), где их применение не рекомендовано или полностью запрещено из-за риска получения некорректных результатов.

Отраслевые ограничения на использование методов одностанционной коррекции для средних широт приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Отраслевые ограничения на использование методов одностанционной коррекции / Industry restrictions on the use of single-station correction methods (Short Collar Correction (SSC))

Диапазон зенитного угла, град	Диапазон азимута, град	Применимость SCC
0–60	0–360	Ограничений нет
60–90	0–60, 120–240, 300–360	Ограничений нет
60–90	60–70, 110–120, 240–250, 290–300	Не рекомендуется
60–90	70–110, 250–290	Запрещено

*Данные рекомендации соответствуют модели ошибок ISCWSA для регионов с умеренным магнитным наклонением

При выполнении работ в районах со значительными углами магнитного наклонения зоны исключения должны быть еще более консервативными.

Описанные ограничения одностанционной коррекции, особенно в условиях высоких широт и больших зенитных углов, обуславливают необходимость применения более сложных методов, основанных на статистической обработке множества измерений.

Многостанционный анализ

Значительным улучшением ранних методик компенсации магнитных помех стал алгоритм статистического анализа группы замеров MSA (Multistation analysis). Метод был предложен Эндрю Бруксом (Baker Hughes INTEQ) в 1998 году, алгоритм метода подробно описан в патенте US6179067B1⁶ и статье SPE 49060 [9]. Главное преимущество методики MSA – это возможность решить проблему магнитных помех буровой колонны для скважин при значительном снижении зависимости от их ориентации. В отличие от одностанционной коррекции (SCC), которая работает с каждым замером независимо и имеет строгие ограничения по азимуту, MSA анализирует всю совокупность данных рейса, что позволяет устранять систематические ошибки более надежно и в более широком диапазоне направлений бурения, однако предъявляет более высокие требования к количеству и качеству данных.

Принцип метода. Метод основан на явном предположении об общих источниках ошибок для всех замеров рейса и минимизации дисперсии относительно значений опорного поля. То есть если общая осевая магнитная ошибка оценива-

ется как смещение (бэйс) ϵbz измерения Z-магнитометра, то для любого n-го замера этого рейса оно может быть скорректировано следующим образом:

$$B_{z_{corr}} = B_{z_{meas}} - \epsilon bz \quad (18)$$

где $B_{z_{corr}}$ – скорректированное значение B_z ;
 $B_{z_{meas}}$ – измеренное значение B_z .

Поиск значения смещения ϵbz выполняется итерационно, верным решением считается такое, при котором дисперсия V измерений параметров фактического магнитного поля относительно референсного значения будет минимальна.

Поскольку вертикальная и горизонтальная компоненты поля не коррелированы между собой, для расчета дисперсии V используется формула

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (B_{h_n} - B_{h_{ref}})^2 + (B_{v_n} - B_{v_{ref}})^2 \quad (19)$$

где суммирование проводится по всем n замерам в рассматриваемом рейсе;

B_h, B_v – значения горизонтальной и вертикальной составляющей магнитного поля, рассчитанные по приведенным ниже формулам;

$B_{h_{ref}}, B_{v_{ref}}$ – референсные значения горизонтальной и вертикальной составляющей магнитного поля, рассчитанные на основании параметров используемой геомагнитной модели.

Измеренная вертикальная компонента на станции n:

$$B_{v_n} = \frac{(B_{x_n} \cdot G_{x_n} + B_{y_n} \cdot G_{y_n} + B_{z_{corr_n}} \cdot G_{z_n})}{(G_{x_n}^2 + G_{y_n}^2 + G_{z_n}^2)^{0.5}} \quad (20)$$

Измеренная горизонтальная компонента на станции n:

$$B_{h_n} = (B_{x_n}^2 + B_{y_n}^2 + B_{z_{corr_n}}^2 - B_{v_n}^2)^{0.5} \quad (21)$$

Референсное значение вертикальной $B_{v_{ref}}$ и горизонтальной $B_{h_{ref}}$ компонент:

$$B_{v_{ref}} = B_{ref} \cdot \sin(Dip_{ref}), \quad (22)$$

$$B_{h_{ref}} = B_{ref} \cdot \cos(Dip_{ref}), \quad (23)$$

где B_{ref} и Dip_{ref} – полный модуль магнитной индукции и угол магнитного наклонения, предсказанные геомагнитной моделью.

Пример сокращения дисперсии и коррекции замеров до уровня соответствия полевым критериям приемки показан на рисунке 5.

Алгоритм решает задачу оптимизации ϵbz , используя значение опорного геомагнитного поля и замеров, сделанных в течении рейса с одной неизменной компоновкой низа буровой колонны. Каждая компоновка имеет уникальную «магнитную подпись». MSA делает расчет магнитной сигнатуры конкретной КНБК и применяет полученные поправки ко всем замерам рейса.

Метод не ограничивается расчетом поправки осевого магнитометра B_z , аналогичным образом могут быть рассчитаны поправки к поперечным осям B_x и B_y , а также масштабные коэффициенты к ним.

При помощи этого же алгоритма может быть проведена коррекция смещений и масштабных коэффициентов акселерометров.

⁶ Brooks A.G. Method for magnetic survey calibration and estimation of uncertainty // Patent No.US6179067B1. Date of Patent: 30.01.2001.

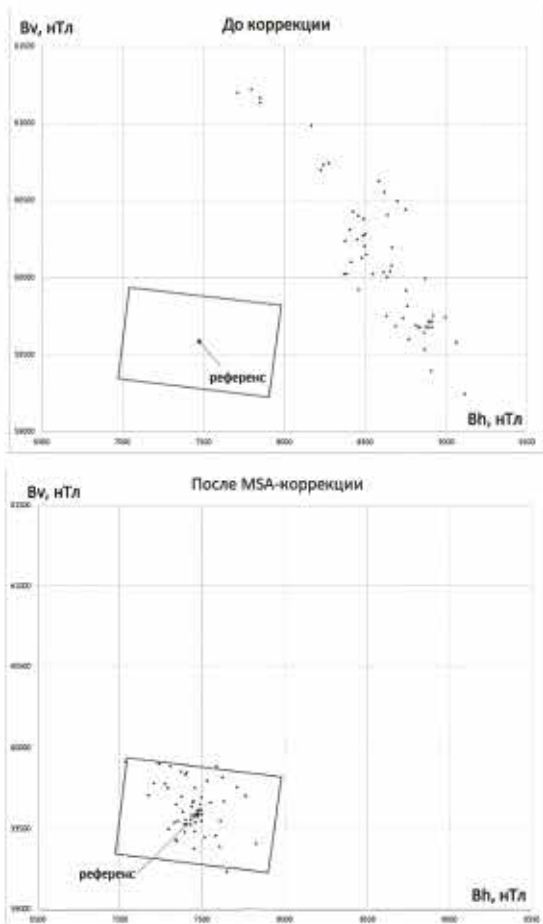


Рис. 5. Замеры до и после коррекции. Выделенная область – граница критериев приемки замеров, определенная относительно референсных значений /

Fig. 5. Measurements before and after correction. The selected area is the boundary of the measurement acceptance criteria, defined relative to the reference values

С помощью многостанционного анализа можно идентифицировать и исправить большинство систематических ошибок, общих для всех замеров рейса. Остаточные ошибки моделируются как случайные или шум датчиков. Величина шума может быть оценена из спецификаций датчиков и характеристик неопределенности поля или из остаточной дисперсии V . Квадратный корень из V может быть использован для приближенной оценки стандартного отклонения σ шума на каждом канале магнитометра.

Условия применения. Для достоверных решений алгоритма необходимо выполнение ряда условий:

- число замеров должно быть не менее чем в три раза больше числа оцениваемых членов ошибки и всегда больше или равно четырем;
- замеры предпочтительно должны быть взяты с равномерным распределением ориентации инструмента вокруг оси и не должны быть сгруппированы в одном угловом секторе;
- траектория скважины должна изменяться по зенитному углу и азимуту минимум на 5° .

Более детально минимальные требования к MSA рассмотрены в работах SPE-125677-MS и SPE-173098-MS [10, 11]. Необходимо отметить, что несмотря на то, что данный метод менее восприимчив к ограничениям, присущим одностанционным алгоритмам коррекции, он также имеет ограничения,

связанные с ориентацией горизонтальных стволов скважин в направлениях запад/восток. Так, при использовании моделей магнитного поля Земли стандартного разрешения, среднее значение произведения $\sin(I) \cdot \sin(A)$ в рейсе должно быть $<0,82$, для IFR-моделей $<0,91$. Замеры, не удовлетворяющие этому условию, относятся к зоне исключений (red zone / no-go zone). При превышении этих значений система уравнений становится плохо обусловленной, что приводит к неустойчивым решениям и резкому росту погрешности коррекции.

Контроль качества измерений. Кроме коррекции замеров, метод MSA широко используется в процедурах контроля качества замеров (QA/QC). В отрасли используется многостанционное тестирование акселерометров (MSAT), магнитометров (MSMT) и многостанционный гиротест (MSGT). Подробно использование многостанционных тестов в процедурах контроля качества описано в работах Роджера Эксета и др. [12, 13]. В работе Нирнес и др. SPE/IADC 96211 [14], посвященной анализу точности и надежности магнитных замеров, сделаны выводы, что MSA наиболее полезен для диагностики внешних воздействий и сбоев датчиков, в то время как наличие ошибок датчиков приемлемой величины сложнее доказать статистически. В исследованиях был сделан вывод о том, что использование MSA без соблюдения требований, предъявляемых к замерам, увеличивает вероятность неправильной интерпретации результатов оценки. Указанные исследования подчеркивают, что MSA всегда будет предоставлять ценную информацию о качестве магнитных съемок.

Проверка на соответствие полевым критериям качества (Field Acceptance Criteria) эффективно выявляет потенциальные проблемы качества замеров, но мало способствует определению причины проблемы или выявлению источников ошибок. Для этого данные замеров могут быть дополнительно проанализированы с использованием расширенных методов многоточечного анализа (MSA) для определения отдельных составляющих ошибки, вызванных смещением, масштабом и несоосностью датчиков. Трендовый анализ также полезен для распознавания характерных форм магнитной интерференции буровой колонны, магнитного бурового раствора и других факторов окружающей среды, влияющих на погрешность замера.

В работе К. Булыченкова SPE 166865 [15] приводится усовершенствованный алгоритм MSA, устойчивый к ошибкам, вызванным неточностью геомагнитной модели, а также позволяющий выполнять точную коррекцию осевой магнитной интерференции в горизонтальных скважинах в направлении запад/восток. Метод основан на выделении доверительного интервала измерений и выполнении вычислений в его пределах.

Коррекция MSA позволяет устранить внешнее влияние КНБК, после чего с помощью скорректированных значений B_x , B_y и B_z можно определить фактические параметры магнитного поля: полный модуль магнитной индукции B , и угол магнитного наклона Dip . Это позволяет оценить применимость используемой геомагнитной модели в данной локации. Для этого траектория скважины должна иметь достаточную вариацию по зенитному углу и азимуту, а сами замеры не должны быть излишне зашумлены.

Практические результаты коррекции замеров

В ходе проведенного исследования была выполнена коррекция замеров методом векторных сумм и MSA для набора

из 15 скважин, в которых дополнительно проводились гироскопические замеры от устья до конца секции под эксплуатационную колонну (ЭК). Цель исследования заключалась в проверке работоспособности алгоритмов одностанционной и многостанционной коррекции, реализованных в среде MS Excel. География района – Крайний Север. Геомагнитные условия района работ можно отнести к очень сложным – горизонтальная составляющая магнитного поля приблизительно 7000 нТл, угол магнитного наклона более 80°. Неопределенности положения скважин в таких условиях возрастают более чем на 50 % по сравнению с умеренными широтами.

Практическое применение одностанционной коррекции методом векторных сумм показало его надежность в несколько меньших пределах, чем предусмотрено зонами исключения метода, авторы связывают это со сложными геомагнитными условиями района работ. Метод приемлемо выполнял осевую коррекцию примерно до середины секции под ЭК с зенитными углами около 50° в «плохих» направлениях. Было принято решение об использовании метода векторных сумм только для коррекции замеров при бурении секции под кондуктор (приблизительно первые 430 м). Использование MSA в верхней секции затруднительно из-за незначительной угловой вариации траектории и помех, вызванных близостью направления и наземного оборудования буровой площадки.

Статистический анализ результатов MSA-коррекции проводился в секциях под ЭК в диапазоне глубин по стволу ~ от 430 до 1330 м, в которых выполнялся набор зенитного угла и азимута для оптимального вскрытия продуктивного пласта. Соответственно, траектории на этом участке имеют наибольший диапазон вариаций направлений, что обеспечивает одно из основных условий успешной коррекции. В ходе исследования устранялась только осевая интерференция: поправка рассчитывалась для магнитометра B_z .

Сравнивалось боковое (латеральное) отклонение между траекториями, построенными по гироскопическим замерам и замерам MWD до и после коррекции. Гироскопические траектории в данном случае приняты как эталонные ввиду того, что они не подвержены ошибкам, свойственным для магнитных измерений.

В процессе вычислений из выборки была исключена одна скважина, не удовлетворяющая условию $\sin(I) \cdot \sin(A) < 0,82$, она практически полностью попадала в зону исключений MSA. Попытки коррекции в ней приводили к ухудшению положения. По четырем скважинам величины коррекции ϵ_{bz} были сопоставимы с неопределенностью геомагнитной модели. В результате по пяти указанным скважинам было принято решение остаться на сырых замерах.

Коррекция выполнялась с использованием двух геомагнитных моделей – BGGM и IGRF.

По оставшимся 10 скважинам коррекция по обеим моделям значительно приблизила траектории к эталонным значениям, модель высокого разрешения BGGM ожидаемо показала лучший результат. По этой модели медианное значение осевой коррекции ϵ_{bz} для 10 скважин составило 890 нТл (диапазон от 146 до 2140 нТл), медиана коррекции азимута при использовании модели BGGM – 3,2° (диапазон от 0,5° до 7°). Минимальное улучшение положения траектории составило 47 %, максимальное – 98 %, среднее – 76 %.

Результаты коррекции для двух моделей приведены в таблице 2 и на рисунках 6 и 7.

Таблица 2 / Table 2

Размеры отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после коррекции /
The size of the deviation of the MWD trajectories from the gyroscope before and after correction

Скв.	Отклонение траектории MWD от траектории гироскопа, м				Величина коррекции			
	Raw* BGGM (без корр.)	BGGM-MSA (коррекция)	Raw IGRF (без корр.)	IGRF-MSA (коррекция)	ΔAz BGGM	ΔAz IGRF	ϵ_{bz} BGGM	ϵ_{bz} IGRF
1	35,21	3,78	38,77	10,65	4,09	3,63	1282	1115
2	26,72	2,98	31,01	8,38	2,90	2,75	920	868
3	13,13	3,09	11,26	4,47	2,61	2,49	2140	2014
4	5,38	2,04	9,16	0,19	0,52	1,26	146	346
5	87,65	0,79	85,87	2,05	7,03	6,68	1773	1664
6	8,54	3,27	14,29	4,73	1,69	0,67	300	111
7	8,41	4,49	10,93	0,94	3,70	3,49	1278	1191
8	25,16	9,86	27,63	15,28	1,25	0,79	201	128
9	77,43	3,02	74,72	9,82	5,29	4,81	1565	1403
10	27,76	6,76	24,97	12,82	2,94	1,56	506	272

Raw* – сырые (необработанные замеры)

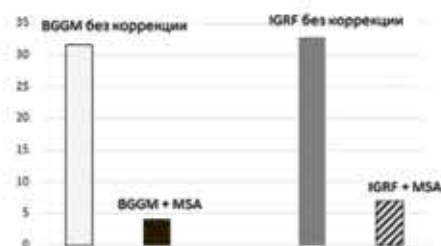


Рис. 6. Средние величины отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после MSA-коррекции по моделям МПЗ, м /

Fig. 6. Average deviations of the MWD trajectories from the gyroscope in meters before and after the MSA correction based on models of the Earth's magnetic field

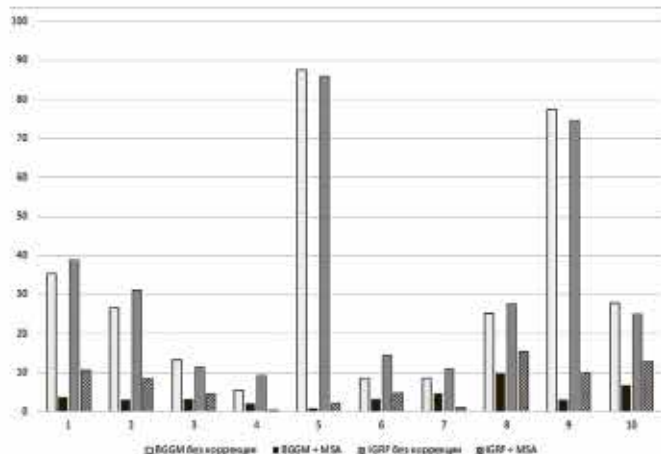


Рис. 7. Величины отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после MSA-коррекции по скважинам и моделям МПЗ, м /

Fig. 7. The magnitude of the deviation of the MWD trajectories from the gyroscope in meters before and after the MSA correction for wells and models of the Earth's magnetic field

Сходимость алгоритма была дополнительно проверена по данным расчета специализированного программного продукта для коррекции MWD-замеров одного из ведущих рос-

сийских разработчиков, расхождение результатов коррекции в Excel и специализированном ПО в конце секции под ЭК не превышали 1 м по всем скорректированным траекториям.

Оценка влияния коррекции на уменьшение эллипсоидов неопределенности в данном исследовании не проводилась, данная работа планируется авторами в качестве темы для дальнейших исследований.

Обсуждение результатов исследования

Важным результатом исследования является успешная апробация алгоритма MSA, реализованного в среде Excel. Это подтверждает, что базовые принципы метода достаточно просты для их понимания и применения силами маркшейдерских служб нефтегазовых компаний. Возможность самостоятельного проведения первичного MSA-анализа позволит оперативно выявлять систематические ошибки на раннем этапе (при условии своевременного получения текущих замеров), не дожидаясь итоговой обработки данных подрядчиком, что снизит риски принятия неверных решений по корректировке траектории и потенциально сэкономит значительные средства. Безусловно, для промышленного применения требуются специализированные программные пакеты, однако данная реализация позволяет оперативно осуществлять внутренний контроль траекторий, предоставляемых подрядчиками, и быстро оценивать качество проводки наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

Выполнение расчетов по двум моделям показало, что метод также может быть использован с моделями низкого разрешения.

Получено подтверждение работоспособности методов одностанционной коррекции в пределах его применимости. Рекомендуется применять одностанционную коррекцию в секции под кондуктор. Для секций под эксплуатационную/техническую колонны и под хвостовик следует применять MSA. Данная стратегия основана на том, что на начальных участках скважин присутствует несистематическое магнитное влияние направления и поверхностного оборудования, зенитные углы часто малы, и траектория не обладает достаточной вариативностью для надежного MSA, что делает робастную одностанционную коррекцию предпочтительным методом. В следующих секциях скважина обладает большей вариацией траектории, и MSA становится более эффективным, тогда как одностанционная коррекция теряет точность и быстро попадает в зоны исключения.

Полученные результаты требуют дальнейшей верификации на более представительной выборке скважин.

Наиболее полезным в дальнейшем представляется решение следующих задач:

- разработки методики, основанной на базе модели опси-бок ISCWSA, позволяющей выполнять расчет параметров эллипсоидов неопределенности для скважин, на которых применялась MSA-коррекция. Методика должна учитывать разные геомагнитные модели и результаты оценки качества коррекции;
- выполнения анализа корреляции между расчетными магнитными помехами КНБК и результатами коррекции;
- определения возможностей и ограничений применения алгоритма MSA в условиях высоких широт с экстремально низким значением горизонтальной составляющей магнитного поля;

– сравнения эффективности MSA для различных геомагнитных моделей;

– разработки формализованных критериев оценки качества коррекции MSA и практических рекомендаций по ее применению.

Отдельно стоит отметить, что в настоящее время большинство программ замеров ограничивается минимальным набором измерений для определения траекторий скважин, любые контрольные измерения относятся, скорее, к редким исключениям. Маркшейдерским службам операторов разработки предлагается серьезно относиться к данному вопросу и настойчиво разъяснять коллегам из буровых и геологических управлений, что однократное измерение может нести в себе невыявленные систематические ошибки и не может считаться полностью достоверным без проведения контрольных процедур. Незначительные затраты времени и средств на повторные замеры ведут к повышению точности проводки скважин, снижению рисков промышленной безопасности, повышению эффективности разработки и, в конечном итоге, конвертируются в баррели нефти и доллары прибыли. Здесь не лишним будет напомнить, что книги маркшейдерских указаний никто не отменял.

Метод MSA показывает наиболее устойчивые решения в секциях с достаточным изменением зенитного угла и азимута. Авторы считают целесообразным проведение ролл-теста в начале секции для контроля кросс-осевой интерференции и ускорения процесса набора достаточной статистической базы замеров для применения коррекции при проводке скважины.

К важным мерам повышения уверенности и контроля качества проводки скважин необходимо отнести проведение замеров гироскопическими приборами при повторных геофизических исследованиях скважин.

При отсутствии IFR-модели и контроле вариаций магнитного поля в районах, расположенных в условиях высоких широт или в местностях со значительными локальными аномалиями магнитного поля, идеальным вариантом является спуск гироскопа до точки вскрытия продуктивного пласта после окончания бурения секции под ЭК и его подъем на поверхность вместе с буровой колонной с записью замеров в двух направлениях: прямо и обратно. Такая операция требует минимальных затрат времени, но значительно снижает неопределенность траектории скважин, что особенно актуально при уплотняющем бурении в высоких широтах. При проведении исследования гироскопические данные по тестовому набору были получены в результате описанной здесь процедуры. По мнению авторов, в любых условиях необходима системная работа по изменению подходов к планированию буровых работ в сторону увеличения количества достоверных данных.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что магнитное влияние буровой колонны является значительным источником систематических ошибок при определении азимута скважин методом MWD. Это приводит к существенной пространственной неопределенности траектории и сопряжено с серьезными технологическими и экономическими рисками.

Аппаратные меры (использование НУБТ и немагнитных элементов КНБК) являются первым и необходимым этапом защиты от магнитных помех. Однако из-за технических ограничений они зачастую недостаточны для полного устранения

внешнего влияния на замеры, особенно в условиях высоких широт и сложных траекторий.

Математические методы коррекции демонстрируют высокую эффективность в компенсации магнитных помех. Одностанционная коррекция (SCC) робастна и применима на начальных участках бурения, однако имеет строгие ограничения, связанные с ориентацией скважины относительно магнитного поля Земли.

Многостанционный анализ (MSA) показал себя как мощный и универсальный инструмент для подавления магнитных помех, позволяющий значительно повысить точность магнитных съемок до уровня, близкого к гироскопическим измерениям, даже в экстремальных геомагнитных условиях Крайнего Севера.

Практическая апробация алгоритма MSA-коррекции в MS Excel доказала возможность их успешного применения силами маркшейдерских служб нефтегазовых компаний для независимого контроля траекторий, предоставляемых подрядчиками.

Главным условием успешного применения методов коррекции является наличие качественных замеров MWD, что требует внедрения строгих протоколов контроля качества измерений, которые не ограничиваются прохождением теста на соответствие полевым критериям (FAC).

Для полной оценки эффекта от коррекции и интеграции ее результатов в систему управления рисками бурения необходима разработка методики расчета эллипсоидов неопределенности, учитывающей применение MSA и SCC, а также формализованных критериев оценки качества коррекции.

Методы математической коррекции, оценка качества за-

меров и другие меры, направленные на повышение точности проводки скважин, являются областью, в которой наиболее полно может раскрыться потенциал маркшейдерских служб нефтегазовых компаний.

Маркшейдерским службам необходимо критически рассматривать действующие программы замеров и оценивать их достаточность с точки зрения возможностей контроля качества замеров. При необходимости включать в программы замеров проведение роли-тестов и повторных измерений при подъеме буровой колонны.

При высоких рисках столкновений скважин или недостижения геологических целей бурения для обеспечения приемлемого уровня точности проводки скважин необходимо рассматривать создание локальной геомагнитной модели (IFR), обеспечение ННБ геомагнитными вариационными данными (PIFR) или применение высокоточных гироскопов для контроля траекторий.

Выводы

1. Проведенное исследование показало, что комплексное применение аппаратных мер изоляции, одностанционной коррекции на начальных участках и многостанционного анализа на последующих этапах бурения, подкрепленное строгим протоколом контрольных замеров, позволяет вывести точность проводки скважин на качественно новый уровень.

2. Внедрение предложенных методик коррекции в практику маркшейдерского обеспечения буровых работ является действенным инструментом снижения рисков пересечения скважин и повышения экономической эффективности разработки месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р. Маркшейдерский контроль пространственного положения скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (3): 21-28.
Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R. Surveying control of the spatial position of wells. *Mine Surveying and subsurface use*. 2025; 25 (3): 21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.
2. Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петров В.Г., и др. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (4): 71-82.
Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Petrov V.G., et al. Geomagnetic data for directional drilling and well positioning. *Mine Surveying and subsurface use*. 2025; 25 (4): 71-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-4-71-82>.
3. Introduction to Wellbore Positioning. *ISCWSA: Well Intercept Sub-committee eBook* URL: <https://www.uhi.ac.uk/en/wellbore-positioning-download/>.
4. Grindrod S.J., Wolff J.M., Calculation of NMDC Length Required for Various Latitudes Developed from Field Measurements of Drill String Magnetization. *Paper IADC/SPE 11382 presented at the 1983 IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, 1983.
5. Wilson H., Brooks A.G. Wellbore Position Errors Caused by Drilling Fluid Contamination. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, 2001. <https://doi.org/10.2118/71400-MS>.
6. Edvardsen I., Nymes E., Gullikstad J. et al. Best Practices and Recommendations for Magnetic Directional Surveying in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE Norway One Day Seminar*. Bergen, Norway, 2019. <https://doi.org/10.2118/195600-MS>.
7. Russell A.W., Roesler R.F. Reduction of Nonmagnetic Drill Collar Length Through Magnetic Azimuth Correction Technique. *Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, 1985. <https://doi.org/10.2118/13476-MS>.
8. Cheatham C.A., Shih S., Churchwell D.L., et al. Effects of Magnetic Interference on Directional Surveys in Horizontal Wells. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, 1992. <https://doi.org/10.2118/23852-MS>.
9. Brooks A.G., Gurden P.A., Noy K.A. Practical Application of a Multiple-Survey Magnetic Correction Algorithm. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, 1998. <https://doi.org/10.2118/49060-MS>.
10. Nymes E., Torkildsen T., Wilson H. Minimum Requirements for Multi-Station Analysis of MWD Magnetic Directional Surveys. *Paper presented at the Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition*. Manama, Bahrain, 2009. <https://doi.org/10.2118/125677-MS>.
11. Hanak F. C., Wilson H., Gjertsen M. Assessment of the Validity of MWD Survey Accuracy Following Multistation Analysis. *Conference: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. London, United Kingdom, 2015. <https://doi.org/10.2118/173098-MS>.
12. Ekseth R., Kovalenko K., Weston J.L., et al. The Reliability Problem Related to Directional Survey Data. *Paper presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Bangkok, Thailand, 2006. <https://doi.org/10.2118/103734-MS>.
13. Ekseth R., Torkildsen T., Brooks A., et al. High Integrity Wellbore Surveys: Methods for Eliminating Gross Errors. *SPE/IADC 105558 presented at the SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, 2007. <https://doi.org/10.2118/105558-MS>.

14. Nyrnes E., Torkildsen T. Analyses of the Accuracy and Reliability of Magnetic Directional Surveys. *Paper presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Dubai, United Arab Emirates, 2005. <https://doi.org/10.2118/96211-MS>.
15. Bulychenkov K. Improving Multistation Analysis of MWD Directional Magnetic Surveys. *Paper presented at the SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2013. <https://doi.org/10.2118/166865-MS>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Николаевич Бухтояров –
начальник отдела маркшейдерско-геодезических работ,
ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: z9851275712@gmail.com

Оксана Рашитовна Старикова –
заместитель начальника отдела маркшейдерско-
геодезических работ ООО «Газпром нефть шельф»,
191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail:
oxy3791@gmail.com

Анастасия Алексеевна Виноградова –
студентка 6-го курса, Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II, 199106, г. Санкт-
Петербург, Российская Федерация, e-mail: Vinog_Nas02@
mail.ru

Критерии авторства:

Б. Н. Бухтояров – написание части текста статьи, анализ источников, редактирование; О. Р. Старикова – реализация алгоритмов коррекции, выполнение вычислений, написание части разделов текста; А. А. Виноградова – разработка и реализация алгоритмов контроля устойчивости решений MSA, выполнение расчетов, написание части текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.09.2025

Поступила после рецензирования: 05.10.2025

Принята к публикации: 12.10.2025

ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Bukhtoyarov –
Head of Surveying and Geodesy Department, Gazprom Neft
Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail:
z9851275712@gmail.com

Oksana R. Starikova –
Deputy Head of the Surveying and Geodesy Department of
Gazprom Neft Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian
Federation, e-mail: oxy3791@gmail.com

Anastasia A. Vinogradova –
5th year student, St. Petersburg Mining University of Empress
Catherine II, 199106, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: Vinog_Nas02@mail.ru

Contribution:

B. N. Bukhtoyarov – writing part of the text, analysis of sources, editing; O. R. Starikova – implementation of correction algorithms, performing computations, writing part of the sections; A. A. Vinogradova – development and implementation of MSA solution stability control algorithms, performing calculations, writing part of the text. Note: all authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 24.09.2025

Revised: 05.10.2025

Accepted: 12.10.2025

Комплекс маркшейдерских работ при разработке золоторудного месторождения подземным способом

В. С. Писарев^{1, 2✉}

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск, Российская Федерация

²ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ v.s.pisarev@sgugit.ru

Аннотация: Приведены результаты исследований по описанию основных параметров добычи и систем разработки, применяемых на руднике Веселый, расположенном в Республике Алтай. Установлены горнотехнические условия, гидрогеологические, а также технология проведения горных выработок. В соответствии с определенными параметрами представлены методы ведения маркшейдерских работ, состав и численность службы главного маркшейдера, требования к безопасному ведению горных работ.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, геотехнический мониторинг, маркшейдерские работы, геометризация месторождения, система разработки, вскрытие, маркшейдерские работы в подземных горных выработках, маркшейдерские работы на поверхности

Благодарность: Автор выражает благодарность руководству рудника Веселый и отдельно М. А. Давыдовой, главному маркшейдеру рудника, за помощь в организации и проведении производства работ.

Для цитирования: Писарев В.С. Комплекс маркшейдерских работ при разработке золоторудного месторождения подземным способом. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):68-75. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-68-75>.

A complex of mining surveying works in the development of a gold deposit by underground method

V. S. Pisarev^{1, 2✉}

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ v.s.pisarev@sgugit.ru

Abstract: The article presents the results of research describing the main parameters of production and development systems used at the Vesely mine located in the Altai Republic. Mining engineering conditions, hydrogeological conditions, as well as mining technology have been established. In accordance with certain parameters, the methods of conducting mining operations, the composition and number of the chief surveyor's service, and the requirements for safe mining operations are presented.

Keywords: gold deposit, geotechnical monitoring, surveying, geometrization of the deposit, mining system, opening, surveying in underground mining, surface surveying

Acknowledgments: The author express their gratitude to the management of the Vesely Mine and separately M.A. Davydova, the mine's Chief Surveyor for their assistance in organizing and conducting the work.

For citation: Pisarev V. S. A complex of mining surveying works in the development of a gold deposit by underground method. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):68-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-68-75>.

Введение

Месторождение рудного золота Синюхинское было открыто в 1950 году в процессе разведочных работ на россышное золото в верховьях реки Синюхи. В 1952 году рудопроявление, получившее название «Первый Рудный», было передано для детальной разведки и опытной эксплуатации участку Веселый треста «Запсибзолото» (Катуно-Бийский прииск треста «Запсибзолото» ГУ МВД СССР).

В последующие годы в результате расширения фронта геологоразведочных работ были выявлены участки: Сининский, Горбуновка, Черемуховая, Ыныргинский, Рудная Сопка, Новый, Файфановский, Западный.

Приказом Западно-Сибирского государственного треста золотой промышленности «Запсибзолото» Министерства цветной металлургии вместо ликвидированного Катуно-Бийского прииска с 1 января 1957 года был организован рудник Веселый и началась промышленная эксплуатация Синюхинского месторождения, продолжающаяся до настоящего времени. Предприятие – действующее и имеет наработанную технологическую схему ведения горных работ, а также определенную годами систему отработки.

Объект исследований

Синюхинское золоторудное месторождение располагается на территории Чойского района Республики Алтай, в 30 км от районного центра, в 105 км от республиканского центра г. Горно-Алтайска, в 200 км от ближайшей железнодорожной станции и речной пристани – г. Бийска. Сообщение между указанными населенными пунктами осуществляется по автомобильным дорогам. Указанные дороги обеспечивают круглогодичную перевозку грузов и движение рейсовых автобусов.

Обзорная карта района расположения района работ представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Обзорная карта расположения района работ /
Fig. 1. Overview map of the work area location

Единственным промышленным предприятием района является рудник Веселый с его базовым поселком Сейка. В настоящее время ведется добыча коренного золота подземным способом. Район представляет собой типичную горно-таежную страну и характеризуется низко-среднегорным рельефом с колебанием абсолютных отметок от

500 м (в долинах рек Сейка, Синюха, Ыныргин) до 800–900 м (на вершинах сопок). К югу наблюдается постепенное увеличение высот. Среднее значение абсолютных отметок – 500–650 м, средние относительные превышения – 200–250 м. Рельеф района благодаря сильному воздействию процессов денудации отличается преобладанием мягких сглаженных форм.

Для месторождения рассчитаны коэффициент рудоносности (линейный), показатель сложности и коэффициент вариации мощностей и содержаний золота (табл. 1) при бортовом содержании 2,0 г/т.

Таблица 1 / Table 1

Статистические параметры, характеризующие сложность
месторождения /

Statistical parameters characterizing the complexity of the deposit

Бортовое содержание, г/т	Изменчивость формы			Изменчивость содержания
	коэффициент рудоносности Kp	показатель сложности q	коэффициент вариации мощности Vnp, %	коэффициент вариации содержания Vc, %
2,0	0,71	0,31	205	218

При анализе полученных показателей становится очевидно, что месторождение имеет сложный характер геологического строения. Так, коэффициент рудоносности соответствует 2-й группе, показатель сложности и коэффициенты вариации мощностей и содержаний однозначно можно отнести к 4-й группе.

В соответствии с «Классификацией запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых», Синюхинское месторождение относится к 4-й группе как месторождение с мелкими и средними по размерам телами, характеризующимися резкой изменчивостью мощности и внутреннего строения, крайне неравномерным качеством полезного ископаемого и прерывистым гнездовым распределением основных ценных компонентов [1].

Руды Синюхинского месторождения тесно ассоциируются со скарновыми залежами. Минеральный состав руд на месторождении изучен достаточно подробно. К настоящему времени в рудном поле описано свыше 30 гипогенных рудных минералов.

Руды Файфановского участка относятся к золото-скарновому типу (сульфидные руды). Основная масса рудных минералов представлена сульфидами меди, среднее содержание которых составляет до 5 %. Одним из основных особенностей месторождения является весьма сложная морфология рудных тел и высокая изменчивость содержания золота. Минералогический состав руды приведен в таблице 2.

На руднике уделяется внимание внедрению и усовершенствованию систем автоматизированного мониторинга, а также разработке методик и оборудования для контроля объектов [2].

Цель работы: рассмотреть комплекс маркшейдерско-геодезических работ, применяемых на руднике с целью анализа и выявления неточностей и последующей оптимизации ведения данных работ.

Таблица 2 / Table 2

Минеральный состав руды /
Mineral composition of the ore

Группа минералов	Содержание, %
Кварц, халцедон, опал и другие соединения кремния, полевые шпаты, мусковит	10,3
Кальцит, арагонит	7,1
Пироксенит, амфиболы, эпидот, гранаты, хлорит, тальк	81,7
Примеси: апатит, циркон, сфен, рутил, флюорит, магнетит	0,2
Сульфиды: борнит, халькопирит, пирит, халькозин, ковелин, галенит, сфалерит, блеклые руды, аргентит, тетрадимит и др.	0,7
Всего	100,0

Методика исследований

На данный момент подземные горные работы ведутся на четырех горизонтах.

Верхний рабочий горизонт рудника (горизонт +425 м) имеет четыре вскрывающие его выработки: вертикальный клетевой ствол шахта № 2, вертикальный разведочно-эксплуатационный штрек РЭШ-5, штольню 13 и транспортный уклон горизонт +520 – +340 м.

Вертикальный клетевой ствол шахта № 2 имеет сечение 3960×2160 мм. Нижняя отметка ствола составляет +425 м. Ствол имеет деревянное крепление, армировка также выполнена из дерева. Для спуска и подъема груза, оборудования, материалов и людей ствол оборудован двумя клетями. Максимальный объем грузовой вагонетки, предназначенной для выдачи горной массы по стволу шахта № 2, составляет $0,7 \text{ м}^3$.

Вертикальный разведочно-эксплуатационный штрек РЭШ-5 проходил с целью разведки и дальнейшего использования в качестве эксплуатационного ствола. Диаметр ствола в свету составляет 6,5 м. Нижний горизонт -15 м. Крепление ствола бетонное, армировка выполнена из металла. Ствол имеет отделение для размещения лестниц, а также труб и электрических кабелей. Эксплуатация ствола в настоящее время приостановлена.

Штольня 13 и транспортный уклон, пройденный прямоугольно-сводчатым сечением площадью 9 м^2 , соединяет промышленную площадку устья штольни 13 горизонт +520 м и горизонт +353 м, длина уклона составляет 600 м. Уклон оснащен конвейером КЛС В800, тип 8080Ф-160-2.

Горизонтальное вскрытие горизонта +425 м осуществлено квершлагом 34, пройденным от околоствольного двора. Запасным выходом с горизонта является штольня 13 горизонт +520 м. Связь между двумя горизонтами осуществляется через штрек 7 горизонт +435 м, восстающий 29, вентиляционный штрек 12 горизонт +465 м, квершлаг 4 горизонт +520 м.

Выработки околоствольного двора ствола шахта № 2 на горизонте +425 м имеют туниковый тип. В выработках, подходящих к околоствольному двору, размещены насосная камера главного водоотлива с горизонта, центральная подземная электрическая подстанция, которая оснащена понижающими и тяговыми трансформаторами, а также резервный источник электрической энергии. Подходной выработкой для транспортировки грузов в околоствольный двор является квершлаг 34. Выработки околоствольного двора на горизонте +425 м предназначены для транспортировки и

выдачи на-гора вагонеток с горной массой, а также доставки материалов и оборудования.

Транспортный уклон с горизонта +425 м на горизонт +390 м имеет прямоугольно-сводчатое сечение 9 м^2 . Уклон пройден без крепления, оборудован скиповым подъемом с использованием вагонетки ВБ-2,5. Уклон предназначен для выдачи руды и породы с горизонта +390 м. По лестничному отделению уклона осуществляется спуск-подъем людей на горизонт. Спуск-подъем материалов и оборудования на горизонт +390 м осуществляется через восстающий 401 с использованием грузовой лебедки.

Шестой от поверхности горизонт с высотной отметкой +390 м вскрыт транспортным уклоном и вентиляционно-ходовыми восстающими, имеющими выход на верхние горизонты.

Горизонтальное вскрытие горизонта +390 м осуществлено квершлагом 1. В околоствольном дворе горизонта +390 м сооружены: насосная камера, сбита водотрубным ходком с уклоном; пункт разгрузки вагонеток УВО-0,8 для погрузки руды и породы в подъемный сосуд уклона. Запасными выходами являются вентиляционно-ходовые восстающие, имеющие выход на вышележащие горизонты.

Горизонт +353 м вскрыт горизонтальными выработками штрек 2 и квершлаг 1. В околоствольном дворе горизонта +353 м расположена насосная камера участкового водоотлива (штрек 2), илоотстойники, водосборники, место разгрузки вагонеток УВО-0,8, оборудованное колосниковыми решетками для пропуска руды нужной фракции. Также на месте разгрузки установлен бутбой для дробления негабаритной фракции горной массы. Из бункеров горизонта +353 м горная масса поступает в приемный бункер качающегося питателя, грузится на конвейерную ленту и выдается на-гора.

Проведение подземных горных выработок включает в себя ряд технологических действий, которые образуют проходческий цикл.

Работы, которые входят в цикл по проходке, можно описать следующими операциями:

- бурением шпуров в забое согласно паспорту;
- выполнением работ по заряданию шпуров и последующему взрыванию;
- проведением пыле-вентиляционных мероприятий;
- зачисткой взорванной горной массы.

Отбойка породы осуществляется буровзрывным способом. Шпуров бурятся перфораторами ПП-63 глубиной 1,6 м для горизонтальных выработок и перфораторами ПТ-45 длиной шпура 1,5 м для вертикальных выработок диаметром 40 мм. В качестве взрывчатого вещества используется аммонит № 6-ЖВ, способ инициирования – электрический. Конструкция заряда – с обратным инициированием. Вруб – клиновой для горизонтальных выработок и прямой призматический, смещенный в сторону грузового отделения для вертикальных выработок.

Для проветривания горизонтальных выработок длиной до 400 м возможно применение (с запасом) имеющегося на руднике вентилятора местного проветривания типа ВМ-5, ВМ-6.

Уборка породы

При проведении горизонтальных выработок породу убирают при помощи породопогрузочных машин или скреперных лебедок. В горизонтальных выработках с площадью

сечения более 5 м² основное применение находят малогабаритные погрузочные машины ковшового типа ППН-1с. Схема уборки горной массы с применением малогабаритных погрузочных машин ковшового типа приведена на рисунке 2.

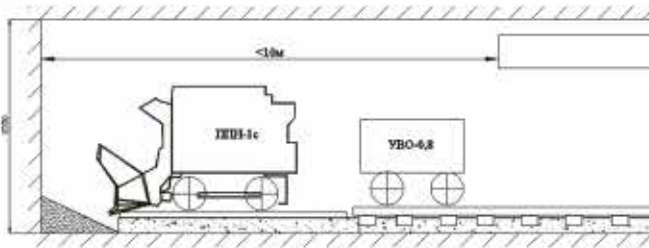


Рис. 2. Схема уборки породы от проходки машины ППН-1с /
Fig. 2. The scheme of rock removal from the sinking machine PPN-1c

Результаты исследований

Топографо-геодезические исследования

В топографо-геодезическом отношении район работ изучен достаточно хорошо. В районе участка работ и вблизи него расположены пункты триангуляции, полигонометрии и нивелирования, определенные в разные годы на территории Чойского района Республики Алтай, рядом с районом работ.

Геодезической основой для создания съемочного обоснования при съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем служат следующие геодезические построения:

- государственные геодезические сети: триангуляция и полигонометрия 1, 2, 3-го и 4-го классов; нивелирование 1, 2, 3-го и 4-го классов;
- геодезические сети сгущения: триангуляция 1-го и 2-го разрядов, полигонометрия 1-го и 2-го разрядов; техническое нивелирование;
- съемочное обоснование: плановые и планово-высотные съемочные сети или отдельные пункты (точки).

Плотность съемочной сети определяется масштабом съемки, высотой сечения рельефа и требованиями обеспечения точности геодезических, маркшейдерских и других работ при дальнейшей разработке месторождения.

Маркшейдерские планы земной поверхности отображают координатную сетку как в государственной системе координат ГСК-2011, так и в условной. Смещения координатной сетки по координатам X и Y – прямоугольные.

В непосредственной близости от устья ствола, обеспечивающей прямую видимость, закладываются репера группами по 3 пункта в соседних вершинах, далее – по выработкам через 300–500 м друг от друга, расстояние между расположенными рядом пунктами должно быть не менее 50 м [3–5].

Для определения дирекционного угла сторон, которые составляют опорную подземную маркшейдерскую сеть, необходимо выполнить гироскопическое или геометрическое ориентирование. При определении координат пунктов подземной опорной маркшейдерской сети (центрирование подземных опорных маркшейдерских сетей) используются способы примыкания к отвесам, которые опущены и установлены в вертикальных горных выработках.

Для ориентирования и центрирования подземных маркшейдерских сетей, которые являются опорными, в качестве исходных пунктов следует использовать пункты опорной сети на земной поверхности. Исходные пункты должны [5]

находиться не далее чем на 300 м от устьев шахтных стволов. Подходный пункт и не менее двух смежных с ним пунктов опорной маркшейдерской сети на земной поверхности закладываются в виде постоянных и долговременных маркшейдерских знаков (постоянный центр, репер).

Установка их целесообразна в капитальных горных выработках.

Точки, которые являются узловыми в полигонометрических ходах, закрепляются с учетом их сохранности на длительный период.

При выборе места заложения точек следует придерживаться следующих рекомендаций:

- обеспечить видимость соседних (смежных) пунктов;
- расстояние между пунктами должно быть как можно больше;
- обеспечить сохранение пунктов на длительное время;
- место должно быть удобным, безопасным и комфортным для проведения измерений.

Постоянные пункты закрепляются в кровле выработки. Конструкция постоянного пункта представляет собой арматуру с отверстием для отвеса. Арматура вбивается в пробуренный шпур, который заливается бетонным раствором. На борту выработки краской пишется номер закрепленного пункта. Пункты ходов, которые не являются постоянными, фиксируются как временные знаки. При заложении пунктов на месте составляется абрис расположения пункта, отличительные знаки пункта и его конструкция. Конструкция временных пунктов в горных выработках представляет собой деревянную пробку, в которую забивается маркшейдерский гвоздь (рис. 3), марка с номером пункта.

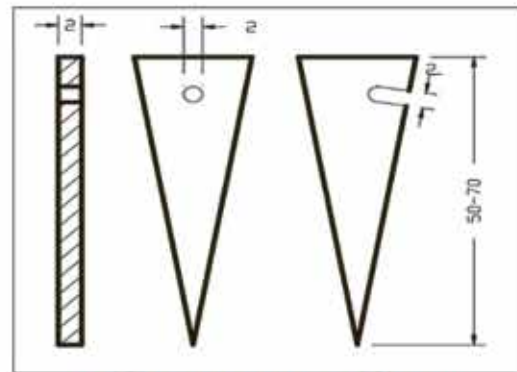


Рис. 3. Конструкция гвоздя маркшейдерского /
Fig. 3. Construction of the surveyor's nail

Порядок нумерации выбирает главный маркшейдер; не допускается повтор номеров пунктов в одной и той же горной выработке.

Сгущение опорной сети для обеспечения съемок на участке горных работ заключается в проложении теодолитных, полигонометрических и тахеометрических ходов по выработкам.

В период разработки месторождения (эксплуатации лицензионного участка) все вновь пройденные горные выработки, которые имеют выход на дневную поверхность, используют для примыкания подземной опорной сети к пунктам опорной маркшейдерской сети на поверхности.

По мере проходки горных выработок подземная опорная маркшейдерская сеть (ОМС) должна пополняться. Расстояние от пунктов полигонометрических ходов опорной мар-

кшейдерской сети до забоев горных выработок не должно превышать 500 м.

Показатели точности измерений в подземных полигонометрических ходах ОМС:

- средняя квадратическая ошибка измерения горизонтальных углов – не более 20", вертикальных – не более 30";
- разница между измерениями линии, которые произведены независимо дважды, – не более 1:3000 ее длины.

Перед развитием съемочной сети должны измеряться контрольный угол и контрольная длина между пунктами в ходе. Допустимая разница между предыдущими и контрольными измерениями: углов – не более 2'; длин – не более 1:1000 ее длины. В тех случаях, когда пункты подвержены деформации или смещениям, маркшейдерские ходы при развитии должны опираться на стороны, которые ориентированы гироскопически с средней квадратической ошибкой не более 3', или на пункты, которые расположены за пределами зоны сдвига и деформации [5].

При обработке результатов подземного полигонометрического хода выполняется вычисление координат пунктов хода, уравнивание сети, оценка погрешности положения самых удаленных пунктов хода.

Порядок камеральной обработки результатов полевых измерений:

- обработка журналов полевых работ;
- приведение измеренных длин сторон хода;
- вычисление средних значений горизонтальных углов;
- обработка вертикальных углов;
- определение и уравнивание дирекционных углов;
- проведение вычисления приращений, их последующее уравнивание;
- вычисление координат точек;
- проведение вычисления превышений, их последующее уравнивание;
- определение высотных отметок точек хода.

Полигонометрические хода уравнивают раздельно, то есть вначале уравнивают угловые измерения, после уравнивают приращения координат [6–9].

В журналах вычислений координат указывают: горную выработку и ее название; дату проведения съемки; номера и страницы полевого журнала, в котором записывались измерения по съемке; абрис и схему ведения работ по съемке [10].

Соединительные съемки

Примыкание способом соединительного треугольника. При способе с верхнего горизонта на горизонт, который ориентируется, опускаются два отвеса А и В, и решают поставленную задачу. Затем на верхнем горизонте в точке С, которая является конечной точкой стороны с заданным дирекционным углом, устанавливается теодолит и измеряются углы и длины сторон соединительного треугольника a , b и c . Таким же способом на нижнем горизонте теодолитом, установленным в точке C' , измеряются углы ϵ' , δ' , γ' и длины сторон нижнего соединительного треугольника a' , b' и c' . Лучшей по точности формой соединительного треугольника является плоская вытянутая форма, в которой углы α , γ , β' и γ' находятся в пределах 3° в отдельности. Также расстояние между отвесами должно быть максимальным по возможности, а точки установки теодолитов С и C' – максимально приближенными к створу отвесов.

Решение задач по примыканию методом соединительного треугольника разрешается выполнять в том случае, когда вычисленные по формулам (2) средние погрешности острых углов α и β' вытянутых треугольников не превышают $\pm 20''$.

$$M\alpha = \pm a/c m_{\gamma} M\beta = \pm b'/c' m_{\gamma'} \quad (1)$$

Средние погрешности m_{γ} и $m_{\gamma'}$ измерений углов на точках С и C' должны не превышать допуск $\pm 7''$. Чтобы получить такую точность теодолитами 4Т30П, нужно каждый угол измерить не менее чем тремя повторениями, а тахеометрами с средней квадратической погрешностью 3'–5'' – одним полным приемом. Разность $\delta - \epsilon - \gamma$ и $\delta' - \epsilon' - \gamma'$ измеренных углов не должна превышать $\pm 20''$. Направления, которые измерены в точках С и C' , уравниваются – невязки распределяются во все углы с обратным знаком. При измерении углов методом круговых приемов вычисляют средние значения одноименных направлений, приведенных к нулю.

Длины сторон соединительных треугольников измеряются рулеткой не менее двух раз с постоянным натяжением, отсчеты берут с точностью до миллиметров. Разница между крайними отсчетами не должна превышать ± 2 мм. Окончательным результатом является среднее арифметическое значение.

Последовательность решения соединительного треугольника и нахождение дирекционного угла, координат точек исходной стороны $C'D'$ подземных съемок с необходимым контролем приведем ниже (рис. 4).

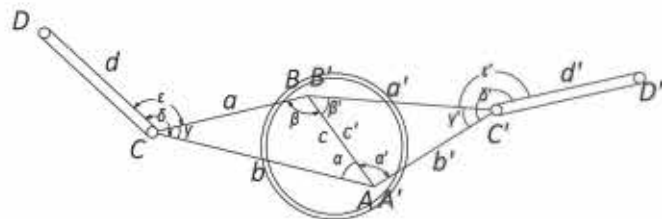


Рис. 4. Схема соединительного треугольника /
Fig. 4. Diagram of the connecting triangle

Углы соединительных треугольников, используемые при дальнейшей обработке, вычисляют, если острые углы α и β не превышают 20° , по формулам синусов:

$$\sin \alpha = \frac{a}{c} \sin \gamma; \sin \beta' = \frac{b'}{c'} \sin \gamma'; \quad (2)$$

$$\sin \alpha' = \frac{a'}{c'} \sin \gamma' \sin \beta' = \frac{b'}{c'} \sin \gamma'. \quad (3)$$

Далее если $\alpha (\beta') > 20^\circ$ и $\beta (\alpha') < 160^\circ$, то применяются формулы вычисления сторон:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{(p-b)(p-c)}{p(p-a)}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \sqrt{\frac{(p-a)(p-c)}{p(p-b)}}, \quad (5)$$

где $p = \frac{1}{2} (a + b + c)$

Для вычисления углов α и β' применяются такие же формулы.

Чтобы проконтролировать правильность вычисления углов по предложенным формулам, нужно получить

суммы углов соединительного треугольника, которые не должны отличаться от 180° больше чем на $10''$. Невязку, которую получили, распределяем поровну на все вычисленные углы.

Для контроля правильности измерений длин сторон соединительного треугольника необходимо вычислить расстояние между двумя отвесами по формуле

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma}. \quad (6)$$

Разность между вычисленным и измеренным значением расстояния между двумя отвесами не должна превышать ± 3 мм для треугольников на поверхности и ± 5 мм – для подземных треугольников.

Для вычисления дирекционного угла стороны $C'D'$ и координат точки C' применяют формулы обработки теодолитного хода двумя путями: вначале через отвес A , затем через отвес B .

В этом случае получают два значения дирекционного угла

$$(\angle C'D') = (DC) + \varepsilon - \beta - \beta' + \varepsilon' - 180^\circ, \quad (7)$$

$$(\angle C'D') = (DC) + \delta + \alpha + \alpha' + \delta' - 3 \cdot 180^\circ. \quad (8)$$

После уравнивания полученные значения дирекционного угла должны полностью совпадать. Таким же способом двумя путями получаем координаты точки C' , которые должны совпадать в пределах точности измерения длин сторон треугольников, а именно в пределах 2–3 мм.

Маркшейдерские высотные опорные сети в подземных горных выработках должны состоять из ходов геометрического и тригонометрического нивелирования, которые прокладываются по капитальным и горно-подготовительным выработкам.

Геометрическое нивелирование выполняют по выработкам, в которых угол наклона не превышает 5° . По наклонным выработкам выполняют тригонометрическое нивелирование, которое допускается производить во время проложения полигонометрического хода.

Перед началом нивелирования необходимо проверить устойчивость реперов, которые используют в качестве опорных. Допускается разница между исходными реперами и проверкой не более 15 мм при техническом нивелировании.

При проведении горнопроходческих и очистных выработок в выемочных участках и очистных блоках маркшейдерские работы называют съемочными.

Эти работы являются наиболее важной задачей службы главного маркшейдера. Срок службы таких выработок относительно небольшой.

От своевременной и качественной съемки зависят эффективная производственная деятельность горного цеха, обеспечение безопасности ведения горных работ, полнота и качество выемки сырья [11–13].

Помимо традиционных маркшейдерских методов наблюдений за деформациями земной поверхности существует метод радарной интерферометрии. Радарная интерферометрия находит применение в маркшейдерской деятельности [14]. А

также помимо геофизических методов для предотвращения чрезвычайных ситуаций своевременное обследование состояния бетонной обделки горных выработок с выявлением мест, в которых возможно разрушение обделки методами от визуального обследования до лазерного сканирования с построением трехмерной модели горной выработки с миллиметровой точностью [15].

Таким образом, комплекс маркшейдерских работ на руднике может включать помимо классических измерений современные геофизические измерения, которые существенно расширяют возможности для анализа и интерпретации и моделирования горнотехнических условий для безопасной отработки месторождения.

Заключение

1. В результате маркшейдерских съемок в нарезных и очистных выработках могут быть получены следующие данные: уточнение формы очистного пространства, условия залегания пород и ее свойства, на основе которых выполняется дальнейшее планирование горно-подготовительных и нарезных работ, также вынос проектного положения элементов горных выработок в натуру и задание им направления и т. п.

2. Объектом исследования съемки являются горная выработка, геологоразведочные скважины, контрольные точки на капитальных сооружениях, элементы и параметры геологического строения месторождения и вмещающих пород, проявление горного давления.

3. Маркшейдерский контроль над проведением горных выработок осуществляют путем их осмотра, замеров, горизонтальных и вертикальных съемок в соответствии с разработанным и утвержденным графиком. Если во время маркшейдерского контроля было обнаружено, что выработка пройдена с отступлением от проекта, то маркшейдер обязан остановить работы для исправления обнаруженных отклонений от проектных решений.

4. В результате выполнения научно-исследовательской работы на руднике проанализирован проект отработки запасов Синюхинского золоторудного месторождения подземным способом и решены следующие задачи:

- изучены горно-геологические и горнотехнические условия разработки месторождения;
- рассмотрены и выделены основные этапы технологического цикла ведения горных работ в рамках проекта отработки запасов Синюхинского золоторудного месторождения;
- рассмотрено маркшейдерское обеспечение горных работ;
- обоснован расчет численности службы главного маркшейдера;
- представлено экономическое обоснование отработки запасов и требования к обеспечению производственной безопасности.

5. В целом оптимизирована технология ведения маркшейдерских работ, выбраны методы выполнения измерений, обработки результатов и подготовки графической документации, а также обоснован выбор оборудования для обеспечения производства маркшейдерских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Писарев В.С. Маркшейдерско-геодезические работы при создании геодинамических полигонов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2020; 2 (106): 35-40.
Pisarev V.S. Geodesic and mine surveying works when developing geodynamic field sites. *Mine surveying and subsurface use*. 2020; 2 (106): 35-40. (In Russ.).
2. Владыкина А.В., Никитин В.Н., Писарев В.С. Разработка программного обеспечения для целей инженерных изысканий и мониторинга искусственных сооружений. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023; 1 (1): 54-59.
Vladykina A.V., Nikitin V.N., Pisarev V.S. Software development for engineering surveys and monitoring of artificial structures. *Interexpo Geo-Siberia*. 2023; 1 (1) 54-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-1-1-54-59>.
3. Ахмедов Б.Н. Построение цифровых трехмерных моделей геопространства. *Инженерная графика и трехмерное моделирование: сборник научных докладов молодежной научно-практической конференции*. Новосибирск, 2016: 9-13.
Ahmedov B.N. Construction of digital three-dimensional models of geospatial. *Engineering graphics and three-dimensional modeling: Collection of scientific reports of the youth scientific-practical conference*. Novosibirsk, 2016: 9-13. (In Russ.).
4. Волков А.В., Еременко А.А., Штирц В.А. Перераспределение зоны максимума опорного давления в днище контура выработанного пространства вглубь вмещающего массива. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2024; 11 (2): 7-16.
Volkov A.V., Eremenko A.A. Stirts V.A. Redistribution of the maximum reference pressure zone in the bottom of the contour of the exhausted space deep into the enclosing massif. *Fundamental and applied issues of mining Sciences*. 2024; 11 (2): 7-16. (In Russ.).
5. Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Панжина Н.А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на коркинском угольном месторождении. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 2: 94-109.
Panzhin A.A., Mazurov B.T., Panzhina N.A. Geodynamic monitoring and modeling of the deformation field at the Korkinsky coal deposit. *News Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 2: 94-109. (In Russ.).
6. Басаргин А.А. Применение методов геоинформатики для изучения и оценивания риска последствий землетрясений. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2022; 27 (6): 89-97.
Basargin A.A. Application of geoinformatics methods for studying and assessing the risk of earthquake consequences. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2022; 27 (6): 89-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-89-97>.
7. Антонов Ю.В. Плотностные неоднородности в земной коре. *Геофизика*. 2005; 1: 62-68.
Antonov Yu.V. Density inhomogeneities in the Earth's crust. *Geophysics*. 2005; 1: 62-68. (In Russ.).
8. Мазуров Б.Т., Кафтан В.И. Обзор развития геодинамики и геодезических методов решения геодинамических задач. *Геодезия и картография*. 2020; 81 (2): 25-39.
Mazurov B.T., Kaftan V.I. Review of the development of geodynamics and geodetic methods for solving geodynamic problems. *Geodesy and cartography*. 2020; 81 (2): 25-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39>.
9. Карпик А.П., Жарников В.Б. О взаимодействии наук о Земле в развитии нефтегазового комплекса страны. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2022; 27 (2): 173-183.
Karpik A.P., Zharnikov V.B. On the interaction of earth sciences in the development of the country's oil and gas complex. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2022; 27 (2): 173-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-2-173-183>.
10. Середович В.А., Алтынцев М.А., Попов Р.А. Исследование точности создания цифровых моделей рельефа и вычисления объемов насыпи и выемки горных пород на основе данных лазерного сканирования. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2015; S5: 66-71.
Seredovich V.A., Altyntsev M.A., Popov R.A. Investigation of the accuracy of creating digital relief models and calculating the volumes of embankment and excavation of rocks based on laser scanning data. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2015; S5: 66-71. (In Russ.).
11. Некрестов Я.А., Гиенко Е.Г. Технологии визуального позиционирования для решения геодезических задач. *Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения*. 2023; 2: 20-24.
Nekrestov Ya.A., Gienko E.G. Technology of visual positioning for solving geodetic problems. *Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions*. 2023; 2: 20-24. (In Russ.).
12. Уставич Г.А., Неволин А.Г., Падве В.А. и др. Анализ технологических схем создания геодезического обоснования на промплощадке. *Записки Горного института*. 2021; 249: 366-376.
Ustavich G.A., Nevolin A.G., Padve V.A., et al. Analysis of technological schemes for creating a geodetic justification at an industrial site. *Notes of the Mining Institute*. 2021; 249: 366-376. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.5>.
13. Репин А.С. О методике геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2021; 26 (3): 28-35.
Repin A.S. On the methodology of geospatial monitoring of the heave mounds of permafrost rocks. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2021; 26 (3): 28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-3-28-35>.
14. Величко И.М. Проведение маркшейдерских работ с использованием радарной интерферометрии для выявления подземных пожаров при разработке угля шахтным способом. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (4): 83-87.
Velichko I.M. Conducting mine surveying using radar interferometry to detect underground fires during coal mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025; 25 (4): 83-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-83-87>.
15. Писарев В.С., Атрушкевич В.А. Обследование ствола шахты фотограмметрическим методом. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024; 4: 760-768.
Pisarev V.S., Atrushkevich V.A. Inspection of the shaft by photogrammetric method. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2024; 4: 760-768. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Виктор Семенович Писарев –

канд. техн. наук, заведующий кафедрой инженерной
геодезии и маркшейдерского дела ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет геосистем и технологий»,
630108, г. Новосибирск, Российская Федерация;
старший научный сотрудник № 3.1 лаборатории
геологоструктурного моделирования ИПКОН РАН, 111020,
г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.07.2025

Поступила после рецензирования: 29.07.2025

Принята к публикации: 27.09.2025

ABOUT THE AUTHOR

Viktor S. Pisarev –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Engineering
Geodesy and Surveying, Siberian State University of Geosystems
and Technologies, 630108, Novosibirsk, Russian Federation;
Senior Researcher No. 3.1, Laboratory of Geostructural
Modeling, IPCON RAS, 111020, Moscow, Russian Federation;
e-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru

Article info

Received: 20.07.2025

Revised: 29.07.2025

Accepted: 27.09.2025

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям:

- 1.6.21. Геоэкология (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),
- 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки)
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки), 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки),
- 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых (технические науки).

NEDRA 4.0

ИННОВАЦИИ, БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ

16–17 февраля 2026 | Санкт-Петербург

КОНГРЕСС ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

130+

КОМПАНИЙ

300+

УЧАСТНИКОВ

35+

ДОКЛАДЧИКОВ

40+

СТЕНДОВ

100+

VIP-ВСТРЕЧ

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ ПРОГРАММЫ:

- Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли
- Отечественные IT-решения и оборудование для добычи и переработки
- Цифровизация процессов добычи и обогащения
- Промышленная безопасность и защита данных
- Современные подходы для анализа данных в промышленности

0+



+ 7 495 198 63 40
nedra4@sbproect.ru

ПРИМИТЕ УЧАСТИЕ В ГЛАВНОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ СОБЫТИИ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ!



Mining Week
KAZAKHSTAN, 2026

**XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР**



23-25
06/2026
КАРАГАНДА, КАЗАХСТАН

TNT EXPO
ТОО «ТНТЕХПО»

tel:
+7 (727) 344 00 63

e-mail:
mintek@tntexpo.kz

inst:
mining.week.kazakhstan

